

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DINÂMICA DE EIXOS TRINCADOS POR MEIO
DE EMISSÃO ACÚSTICA

GILBERTO LUIZ DOS SANTOS PIMENTEL JUNIOR

Belo Horizonte, 19 de julho de 2016

Gilberto Luiz dos Santos Pimentel Junior

**ANÁLISE DINÂMICA DE EIXOS TRINCADOS POR MEIO
DE EMISSÃO ACÚSTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico

**Orientador: Prof. Marco Túlio Corrêa de Faria,
Doutor-Universidade Federal de Minas Gerais.**

**Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2016**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

"ANÁLISE DINÂMICA DE EIXOS TRINCADOS POR MEIO DE
EMIÇÃO ACÚSTICA"

GILBERTO LUIZ DOS SANTOS PIMENTEL JUNIOR

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto Mecânico**".

Dissertação aprovada no dia 19 de julho de 2016.

Por:

Prof. Marco Túlio Correa de Faria
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Lazaro Valentim Donadon
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Eduardo Bauzer Medeiros
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido o amparo necessário nos momentos em que diminui minha resistência. Por ter me concedido a honra e o prazer de conviver com pessoas tão especiais e que contribuíram decisivamente para a elaboração, desenvolvimento e conclusão deste estudo;

Ao Prof. Dr. Marco Túlio Corrêa de Faria, amigo, professor, conselheiro e orientador, pela confiança, paciência e respeito com que me acolheu e cuidou de toda esta jornada, desde a época da “TEMIDA” disciplina de Dinâmica de Rotores, a qual me abriu as portas para a busca pelo desafio de me aprofundar no mundo das máquinas rotativas.

Ao amigo Frederico Bolsoni, aluno de graduação em Engenharia Aeroespacial, pelo comprometimento e profissionalismo dedicados a este estudo nas etapas de planejamento, implementação de testes, aquisição e análise de sinais. Sem a sua ajuda esta pesquisa não teria avançado tanto em tão pouco tempo;

Ao Prof. Dr. Alexander Mattioli Pascoal, professor da disciplina Acústica Fundamental, pelas observações, feitas durante o período de aulas, acerca dos fenômenos de Emissão Acústica, as quais ajudaram, sobremaneira, o desenvolvimento deste estudo;

Ao Prof. Dr. Adriano Vilela Barbosa, professor da disciplina Processamento de Sinais, pela valorosa contribuição, por meio de exemplos e observações, durante o período de aulas, acerca dos fundamentos de tratamento de sinais aplicados a este estudo;

Ao Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho, do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, pela grandiosa contribuição acerca dos efeitos eletromagnéticos e suas formas de manifestação, os quais foram fundamentais para a elaboração de medidas corretivas que diminuiram ou extinguiram as interferências no sistema de aquisição de sinais;

Ao Sr. Paulo Roberto de Souza, Técnico em Eletricidade do CPH, pela dedicação e profissionalismo com o qual atuou nos trabalhos de aterramento das instalações do Grupo de Dinâmica de Rotores;

Ao Sr. Geraldo Vieira Garcia, Técnico em Usinagem do CPH, pela dedicação e profissionalismo com o qual atuou na produção de componentes importantes para utilização na Bancada Compacta de Testes;

A Monique da Silva Neves, o “Amor da minha vida toda” e minha esposa, pela sua compreensão, nos momentos que não estive tão presente, devido aos envolvimento nesta pesquisa, pelo seu Amor, carinho e admiração que me fizeram acreditar e seguir em frente. Pela grandiosa contribuição na crítica deste trabalho.

“Os covardes nunca tentaram, os fracos ficaram pelo caminho, somente os fortes conseguiram.”

(Autor desconhecido – Escola de Especialistas da Aeronáutica - EEAr)

Sumário

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de símbolos	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Métodos não destrutivos de monitoramento	2
1.1.1.O método baseado em Emissão Acústica	2
1.2. Motivação e objetivo deste estudo	5
1.3. A organização deste trabalho	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. A presença de trincas em eixos rotativos: O movimento de abertura e fechamento de uma trinca transversal (Breathing Effect).....	7
2.2. O Fenômeno de Emissão Acústica.....	8
2.3. A Transformada de Wavelet	14
2.3.1.A Transformada Discreta de Wavelet.....	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1. Descrição dos eixos.....	22
3.2. Descrição do sistema de aquisição de dados	22
a) Sensor de EA	22
b) Transmissão de sinais	23
c) Console PXI 1042.....	23
3.3. Metodologia.....	23
3.3.1.Eixos estacionários	24
a) Montagem do aparato experimental	24
b) Aquisição de Sinais	25
c) Análise de sinais	26
3.3.2.Eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos	27
a) Montagem.....	28
I. Aterramento da rede elétrica.....	28
II. Aterramento do Inversor de alimentação do motor	28
III. Aterramento dos cabos de alimentação do motor	28
IV. Aterramento do console PXI 1042	28
V. Aterramento da estrutura da bancada compacta	28
VI. Instalação do sensor de EA.....	28
VII. Isolamento do contato entre o sensor de EA e a estrutura metálica do suporte do mancal hidrodinâmico	29
b) Aquisição de sinais	29
c) Análise de sinais	30

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1. Eixos estacionários.....	32
4.2. Eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos.....	35
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	44
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

Lista de Figuras

Figura 1 – Área de seção reta do eixo e a razão μ entre p e r .	7
Figura 2 – Movimento de abertura e fechamento de uma trinca transversal durante uma revolução do eixo seguindo o sentido anti-horário de rotação, Sinou e Lees (2005).	8
Figura 3 – Representação da propagação de uma onda de cisalhamento oriunda de uma fonte de EA, adaptada de Pekeris e Lifson (1957).	11
Figura 4 – Propagação de ondas de Rayleigh na superfície de um cristal piezoelétrico. Imagem captada por Microscópio de Varredura Eletrônica. Veith (1985).	12
Figura 5 – Processo de partição da energia elástica em uma fonte estática. Adaptado de Wadley, Scruby, e Speake (1980).	13
Figura 6 – Aumento de Publicações Científicas ligadas à pesquisa com Wavelets, adaptada de Addison (2002).	15
Figura 7 – Em a) o sinal captado $x(t)$ no domínio do tempo e em b) a FFT do sinal $x(t)$, adaptada de Merry (2005).	15
Figura 8 – Seção de análise do sinal e informações de frequência na análise no domínio do tempo, adaptado de Gabor (1946).	16
Figura 9 – STFT do sinal $x(t)$. (a) Janelamento de 0,03 s e (b) Janelamento de 0,6 s, adaptada de Merry (2005).	16
Figura 10 – STFT do sinal $x(t)$ com janelamento de 0.15 s, adaptada de Merry (2005).	17
Figura 11 – Em a) o controle de dilatação e em b) o controle de translação, adaptada de Addison (2002).	18
Figura 12 – Comparação entre uma Wavelet mãe e um sinal arbitrário $x(t)$. Adaptada de Addison (2002).	18
Figura 13 – Quantificação do grau de semelhança entre uma Wavelet Chapéu Mexicano $\psi(f)$ e um sinal captado qualquer $x(t)$, adaptada de Addison (2002).	19
Figura 14 – Decomposição de um sinal captado qualquer $x(t)$ em coeficientes de Aproximação A_N e de Detalhes D_N .	20
Figura 15 – Bancada Compacta de Testes Dinâmicos.	27
Figura 16 – Desenho do eixo utilizado nos ensaios, Pimentel Junior et al (2014).	22
Figura 17 – Simulações de trinca transversal.	23
Figura 18 – Esquema de montagem do conjunto de aquisição de sinais de EA, Pimentel Junior, Bolsoni e Faria (2015).	24
Figura 19 – Conjunto completo para análise de sinais em eixos estacionários. Em a) a haste encontra-se recolhida antes de seu movimento pendular. Em b) a haste toca o eixo no ponto de batida. Pimentel Junior, Bolsoni e Faria (2015).	25
Figura 20 – Período considerado para análise do sinal de EA coletado durante a segunda batida realizada no Eixo 3. Em a) o sinal captado e em b) a região considerada para análise (0,2s a 0,4s).	25
Figura 21 – Sobreposição dos sinais de EA coletados dos cinco ensaios de batidas no Eixo 1. Em a) Sobreposição dos sinais captados e em b) Sobreposição de histogramas pontuais.	26
Figura 22 – Fixação do sensor de EA ao suporte do mancal esquerdo.	29
Figura 23 – Decomposição por Wavelet dos coeficientes de Aproximação e de Detalhes do sinal.	31

Figura 24 – Decomposição de sinais de EA, faixas de operação do sensor e de frequências analisadas.	31
Figura 25 – Histogramas pontuais de comparação entre os sinais de EA. A) Eixo 1 e B) Eixo 2.....	32
Figura 26 – Histogramas pontuais de comparação entre os sinais de EA. C) Eixo 3 e D) Eixo 4.....	32
Figura 27 – Histogramas pontuais de comparação entre os sinais de EA. E) Eixo 5 e F) Eixo 6.....	33
Figura 28 – Distribuição das densidades de frequências das amplitudes dos sinais de EA, para cada um dos eixos.	34
Figura 29 – Aproximações Polinomial, Logarítmica e Exponencial para a relação entre os valores de α_4 e a profundidade p de uma trinca transversal.	35
Figura 30 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade de operação de 1.107 RPM.....	36
Figura 31 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade de operação de 1.107 RPM.....	36
Figura 32 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade de operação de 2.250 RPM.....	37
Figura 33 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade de operação de 2.250 RPM.....	38
Figura 34 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade de operação de 4.377 RPM.....	39
Figura 35 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade de operação de 4.377 RPM.....	39
Figura 36 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade de operação de 6.012 RPM.....	41
Figura 37 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade de operação de 6.012 RPM.....	41
Figura 38 – Aproximações Polinomial, Exponencial e Logarítmica para a relação entre os valores do Desvio Mediano Absoluto e a profundidade p de uma trinca transversal.....	43

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Variação de ω_n em função da razão μ , adaptada de Sinou e Lees (2005).	7
Tabela 2 – Profundidade da trinca transversal em cada eixo.	22
Tabela 3 – Valores da média X e do Desvio Padrão σ para cada um dos cinco impactos, para cada eixo. ...	33
Tabela 4 – Valores da média X e do Desvio Padrão σ dos valores das cinco batidas para cada eixo.	33
Tabela 5 – Valores da Obliquidade Estatística e da Curtose para cada eixo.	34
Tabela 6 – Equações de aproximação para o crescimento da trinca transversal.....	35
Tabela 7 – Valores do Desvio Mediano Absoluto dos níveis de análise D_1 ao D_4 para a velocidade de operação de 1.107 RPM.....	37
Tabela 8 – Valores do Desvio Mediano Absoluto dos níveis de análise D_1 ao D_4 para a velocidade de operação de 2.250 RPM.....	38
Tabela 9 – Valores do Desvio Mediano Absoluto dos níveis de análise D_1 ao D_4 para a velocidade de operação de 4.377 RPM.....	40
Tabela 10 – Valores do Desvio Mediano Absoluto dos níveis de análise D_1 ao D_4 para a velocidade de operação de 6.012 RPM.....	42
Tabela 11 – Equações de aproximação para o crescimento da trinca transversal.....	43

Lista de símbolos

ω_n – Frequência natural do sistema;

K – Rigidez do sistema;

p – Profundidade da trinca transversal;

r – Raio da seção transversal do eixo;

μ – Razão entre p e r ;

f_s – Frequência de aquisição do sinal de Emissão Acústica;

t – Tempo;

P – Onda mecânica de compressão;

S – Onda mecânica de cisalhamento;

H – Profundidade da fonte de Emissão Acústica;

$x(t)$ – Sinal captado;

P – Período do sinal captado;

a – Coeficiente de dilatação da Transformada Contínua de Wavelet;

b – Coeficiente de translação da Transformada Contínua de Wavelet;

m – Coeficiente de dilatação da Transformada Discreta de Wavelet;

n – Coeficiente de translação da Transformada Discreta de Wavelet;

N – Conjunto dos números inteiros;

\bar{X} – Média dos valores das amplitudes dos sinais captados, em cada ensaio de batida, por eixo;

\bar{X}_{EIXO} – Média dos valores das médias das amplitudes dos sinais captados, em cada ensaio de batida, por eixo;

σ – Desvio Padrão dos valores das amplitudes dos sinais captados em cada ensaio de batida;

σ_{EIXO} – Média dos valores do Desvio Padrão em cada eixo;

α_3 – Valor da Obliquidade Estatística;

α_4 – Valor da Curtose;

Ω_{Eixo} – Velocidade de rotação dos grupos de acionamento e análise;

Ω_{Motor} – Velocidade de rotação do motor elétrico.

RESUMO

Este estudo baseou-se nos fundamentos de Emissões Acústicas, com ênfase na análise de dados estatísticos e a aplicação transformada de Wavelet, e nos fundamentos da dinâmica de rotores, com ênfase na resposta dinâmica de seis eixos com presença de trincas transversais, as quais seguiam uma razão μ , crescente, entre os valores de suas profundidades p e o raio r da seção reta de cada eixo. A metodologia se desenvolveu em duas etapas. Na primeira foram analisados sinais de Emissões Acústicas em seis eixos estacionários. Nesta etapa cada um dos eixos foi suspenso por dois fios de nylon em suas extremidades, atendendo a condição Livre – Livre. Cada eixo sofreu cinco batidas por meio de uma haste metálica, a qual era suspensa por um aparato experimental. As análises de Obliquidade Estatística α_3 e de Curtose α_4 dos valores das amplitudes dos sinais sugerem uma relação direta entre a diminuição dos valores destes indicadores estatísticos e o aumento da profundidade p da trinca transversal. Na segunda etapa foram analisados sinais de EA em seis eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos. Nesta etapa cada um dos seis eixos operava em quatro velocidades específicas, sendo uma subcrítica e três supercríticas. Estas velocidades eram geradas por meio de uma Bancada Compacta de Testes Dinâmicos. A decomposição dos sinais de EA, por meio da Transformada Discreta de Wavelet, e a análise do Desvio Mediano Absoluto dos valores das amplitudes destes sinais sugerem uma relação direta entre o aumento dos valores deste indicador estatístico e o aumento da profundidade p da trinca transversal.

Palavras chaves: Emissões Acústicas; Curtose; Mancais Hidrodinâmicos; Desvio Mediano Absoluto e Wavelet.

ABSTRACT

This study was based on the fundamentals of Acoustic Emissions, with emphasis on statistical data analysis and the application of wavelet transform and the fundamentals of rotor dynamics, with emphasis on dynamic response of six axes with presence of transverse cracks which followed an increasing ratio μ between the values of their depths p and the radius r of the cross section of each axis. The methodology is developed in two ways. In the first analysis acoustic emissions signals were analyzed in six stationary axes. In this mode each axis was suspended for two nylon threads at their ends, given the Free - Free condition. Each axis experienced five beats of a metal rod, which was suspended using an experimental apparatus. Analyses of Skewness α_3 and kurtosis α_4 of the amplitudes of the Acoustic Emission signals suggest a direct relationship between the decline in values of these statistical indicators and increasing depth p of transverse crack. In the second analysis AE signals were analyzed in six rotary axes supported in hydrodynamic bearings. In this analysis each axis operated at four specific speeds. These speeds were generated by a Dynamic Compact Bench Tests. The decomposition of AE signals through the discrete wavelet transform and the analysis of the Median Absolute Deviation of the amplitude values of these signals suggest a direct relationship between the increase in the value of this statistical indicator and the increasing of the transverse crack depth p .

Key words: Acoustic Emission; Kurtosis; hydrodynamic bearings; Median Absolute Deviation and Wavelet.

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma descrição sobre os propósitos do monitoramento de máquinas rotativas. A importância da medição de movimentos e esforços, da coleta e análise de sinais também é destacada. Os fundamentos da técnica não destrutiva de monitoramento de sinais, com ênfase no método de Emissão Acústica (EA), também são abordados, por meio da apresentação de literatura específica relativa à pesquisa destes tipos de sinais. O texto apresenta, ainda, a motivação e os objetivos deste trabalho, bem como a sua organização.

Para Vance (1988) as turbomáquinas modernas produzem ou absorvem enormes quantidades de energia. Os motores a jato propulsionam aviões em voos supersônicos, as Turbobombas elevam as taxas de produção nas indústrias petroquímicas e as turbinas podem produzir Megawatts para nossa utilização. A principal característica que permite às turbomáquinas produzirem elevadas quantidades de energia e altas taxas de fluxo é a alta velocidade de rotação de seus eixos.

Mohanty (2015) afirma que para garantir que estas máquinas trabalhem sem intervalos significativos de paradas é necessário que elas apresentem boas condições de operação. O monitoramento das condições operacionais destes tipos de equipamentos lida com aspectos referentes ao presente e ao passado da manutenção. Com o intuito de se conhecer estas condições, sensores são instalados em pontos específicos das máquinas rotativas para coletarem e analisarem o seu comportamento, desta forma as decisões acerca dos procedimentos de manutenção podem ser tomadas em momentos oportunos.

Lifson e Simmons (1990) mostram que o monitoramento eficiente de máquinas rotativas requer que três aspectos principais sejam cumpridos:

- A medição de movimentos e forças que atuem criticamente sobre o sistema;
- A aquisição, síntese e organização dos sinais; e
- A interpretação destes sinais.

Graças ao avanço tecnológico existem, atualmente, ferramentas mais precisas para obter estas informações. Acelerômetros são componentes que apresentam baixo custo e boa sensibilidade para captar sinais de vibração em rotores de uma maneira geral. Os sensores de proximidade têm sido efetivos, por mais de 20 anos, para medir as vibrações orbitais em eixos rotativos.

Ainda de acordo com Lifson e Simmons (1990), tornou-se comum a instalação de sistemas de monitoramento de sinais de vibrações em equipamentos críticos e de custo elevado, sendo o seu principal objetivo detectar o aumento dos níveis de vibrações quando um problema mecânico

começar a ocorrer, evitando assim os seus efeitos negativos que podem levar o sistema a um colapso.

1.1. Métodos não destrutivos de monitoramento

As técnicas não destrutivas *in-situ* vêm tomando um papel importante na detecção de falhas no âmbito da Dinâmica de Rotores nas últimas décadas. Estes métodos de análise facilitam relacionar as características dos materiais e seus efeitos ao comportamento dinâmico de equipamentos em tempo real.

De acordo com Mohanty (2015), do número total de métodos empregados na atividade de monitoramento e condicionamento de sinais, 10% correspondem aos ensaios não destrutivos. Alguns deles necessitam de conhecimentos e treinamentos complexos para a sua efetiva aplicação. Ele afirma que, atualmente, dentro da gama de técnicas não destrutivas, os métodos mais utilizados são:

- Radiografia;
- Ultrassom;
- Partícula Magnética;
- Correntes Parasitas;
- Vibrações Mecânicas; e
- Emissão Acústica.

1.1.1. O método baseado em Emissão Acústica

Mohanty (2015) também afirma que a análise pelo método baseado em Emissão Acústica vem se tornando, cada vez mais, uma ferramenta importante no monitoramento não destrutivo de materiais, estruturas e máquinas rotativas. A detecção de sinais de Emissão Acústica (EA) é baseada na liberação espontânea de energia durante alguma mudança irreversível em um ponto da microestrutura de um material, o qual se torna uma fonte de EA. A liberação desta forma de energia gera um pulso, o qual se propaga através do material como uma onda mecânica. Esta dissipação de energia está diretamente ligada à propagação de trincas e ao atrito. Também são consideradas como fontes de EA, entre outros, os fenômenos de solidificação, liquefação e cavitação. As características de uma onda de EA estão relacionadas aos mecanismos de geração de energia na fonte e à propagação através do meio.

Na última década a análise de EA vem sendo empregada no diagnóstico de máquinas rotativas, como nos estudos de Kurz (2004), Elforjani e Mba (2009), Elforjani e Mba (2011) e Niknam et al. (2013).

Elforjani e Mba (2010) estudaram a aplicabilidade da técnica de EA na detecção e localização de falhas em mancais de rolamentos de esferas, por meio da troca da pista de rolagem original do mancal por uma pista de rolagem plana para rolamentos cilíndricos, aumentando assim a pressão de contato dos rolamentos de esferas e acelerando o processo de degradação dos mancais. Concluíram que a presença de defeitos, a sua propagação e a sua localização podem ser detectadas por meio do emprego das técnicas de análise espectral e de entropia em sinais de EA.

Choudhury e Tandon (2000) simularam erosões nas pistas de mancais de rolamento de esferas e realizaram medições de EA para diferentes tamanhos de defeitos. Eles mostraram que os pulsos de sinais de EA, para defeitos em estágios iniciais, ultrapassam um valor específico de amplitude. Eles afirmam que as deformações plásticas e o crescimento de trincas são fontes potenciais de geração de sinais de EA.

Al-Ghamd e Mba (2006) apresentaram um estudo comparativo entre as técnicas de EA e a análise de vibrações. Eles mostraram a relação entre a duração do sinal de Emissão Acústica e a dimensão do defeito em mancais de rolamento de esferas. Eles mostraram, também, que a principal fonte de sinal de Emissão Acústica, em mancais de rolamento de esferas, são as saliências superficiais das pistas de rolagem. Mostraram, ainda, que a amplitude máxima de RMS do sinal de EA, aliada à análise dos valores de Curtose, mostrou ser mais sensível na detecção de falhas se comparada à técnica de análise de vibrações.

Chacon et al. (2014) aplicaram a técnica de EA na detecção de falhas em mancais de rolamentos de esferas, por meio de uma metodologia que consiste na utilização de um pacote Wavelet, para filtragem de sinal, da Transformada de Hilbert para extração de dados e de funções de autocorrelação para detecção de padrões nos sinais. Eles concluíram que o método proposto apresentou boa capacidade de detecção de padrões nos sinais para estágios iniciais de falhas, quando utilizada a Wavelet de Daubechies, com onze níveis de varredura (Db11). Eles mostram que a faixa de frequência de maior eficiência nos resultados apresentava-se de 375 kHz à 500 kHz.

Mirhadizadeh et al. (2010) investigaram a influência de variáveis operacionais de um sistema rotativo, apoiado em mancais hidrodinâmicos, sobre o aumento nos níveis de EA. Eles concluíram que as principais fontes de EA são os efeitos de atrito entre o eixo e o fluido e, ainda, entre o fluido e a parede do mancal hidrodinâmico.

Sekhar (2004) analisou, por meio de EA e tratamento por Wavelet, a influência de trincas transversais no comportamento dinâmico de eixos horizontais rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos. Os eixos eram desacelerados por meio do corte da alimentação do motor, até a

parada completa. O autor concluiu que o emprego de Wavelet é uma excelente ferramenta na detecção de resposta subcrítica do sistema.

Mba et al. (2004) compararam a utilização de sinais de EA de alta frequência e a análise de vibrações para detectar o contato entre o eixo e os retentores de uma turbina 217MVA. Eles concluíram que as assinaturas dos sinais de EA nos mancais demonstram o efeito de atrito e que a utilização da técnica de EA detectou, ainda, sinais de atrito em outros dois pontos não detectados pela análise de vibrações.

Leahy et al. (2006) empregaram a técnica de EA, em comparação com a técnica de análise de vibrações, em uma investigação experimental para detectar o contato induzido axialmente entre um eixo, suportado por mancais hidrodinâmicos de 178mm, e os retentores de uma turbina. Eles concluíram que o posicionamento dos sensores é um fator importante na eficiência da técnica de EA e que a sua utilização é uma boa ferramenta para detectar estes tipos de contato.

Mirhadizadeh e Mba (2009) empregaram a técnica de EA para investigar a influência da velocidade de rotação e do carregamento de eixos suportados em mancais hidrodinâmicos na geração de sinais de EA. As observações mostraram que a variação de velocidade tem maior influência na geração de sinais de EA se comparada à variação de carregamento, o que se relaciona diretamente às perdas geradas pelo cisalhamento do lubrificante.

Lu et Chu (2011) apresentaram um estudo comparativo entre a técnica de EA e a análise de vibrações mecânicas em eixos suportados por mancais hidrodinâmicos. Eles utilizaram a diferença temporal de propagação da onda de EA entre a fonte dos sinais, uma trinca transversal no eixo rotativo, e os sensores posicionados em pontos específicos do aparato experimental. Eles aplicaram a transformada de Wavelet para decompor os sinais de EA e posteriormente os reconstruíram para analisar as suas características para localizar a posição da trinca. Eles demonstraram que a técnica de EA foi efetiva para localizar a posição da trinca transversal no eixo rotativo e, ainda, que o método de análise de vibrações é viável para medir a profundidade de uma trinca transversal.

Mba e Hall (2002) realizaram estudos sobre a propagação de sinais de EA pelos componentes de uma turbina de seis estágios e 550MW. Estes sinais foram produzidos pelo contato entre o rotor e a carcaça. O estudo concluiu que as ondas de EA podem se propagar pelo sistema a uma distância de até dois metros. Entretanto o seu sucesso está diretamente ligado ao controle de ruído.

Pimentel Junior et al. (2015) utilizaram tratamento estatístico em sinais de EA, extraídos de ensaios de batidas realizados em seis eixos com diferentes profundidades de trincas transversais. Eles mostraram que, por meio da análise dos valores de Curtose e de Obliquidade Estatística da distribuição de frequências das amplitudes dos sinais de EA, foi possível identificar a presença deste tipo de descontinuidade, bem como monitorar o seu crescimento nos eixos.

1.2. Motivação e objetivo deste estudo

No universo da pesquisa de sinais de Emissão Acústica, a quantidade de trabalhos relacionados aos estudos da presença de trincas em rotores apoiados por mancais hidrodinâmicos pode ser considerada como restrita. Esta observação serviu como motivação para este estudo, o qual pretende avaliar a potencialidade do emprego da análise de sinais de EA na avaliação da presença de trincas transversais no comportamento de seis eixos, nos casos estacionário e rotativo.

Supõe-se que as tensões produzidas pelo movimento de abertura e fechamento de uma trinca transversal são capazes de gerar energia na forma de pulsos de EA, da ordem de dezenas de kHz a poucos MHz. Supõe-se, ainda, que para o caso da análise dos eixos rotativos, as ondas de EA podem ser transmitidas aos suportes dos mancais e captadas pelo sensor.

1.3. A organização deste trabalho

O capítulo um apresenta uma breve revisão de trabalhos desenvolvidos sobre a utilização da análise de EA na detecção de falhas em mancais de rolamentos e no estudo da propagação dos sinais de EA em sistemas rotativos suportados em mancais hidrodinâmicos.

O capítulo dois aborda a revisão dos conhecimentos necessários ao entendimento e ao desenvolvimento da pesquisa. Serão tratados assuntos relativos aos fundamentos da Dinâmica de rotores, no que se refere à presença de uma trinca em eixos rotativos, dos fundamentos de Emissão Acústica e, ainda, dos fundamentos da análise por meio da técnica de Wavelets.

O capítulo três descreve os principais equipamentos utilizados na pesquisa e a metodologia desenvolvida, a qual se dividiu em duas etapas. Na primeira foram analisados sinais de EA em seis eixos estacionários. Nesta etapa cada um dos eixos foi suspenso por dois fios de nylon em suas extremidades, atendendo a condição Livre – Livre. Cada eixo sofreu cinco batidas por meio de uma haste metálica, a qual era suspensa por um aparato experimental. Na segunda etapa foram analisados sinais de EA em seis eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos. Nesta etapa cada um dos seis eixos operava em quatro velocidades específicas, sendo uma subcrítica e três supercríticas. Estas velocidades foram geradas por meio de uma Bancada Compacta de Testes Dinâmicos.

O capítulo quatro aborda a análise dos resultados. Para o caso dos eixos estacionários verifica-se uma estreita ligação entre a diminuição dos valores dos indicadores estatísticos de Curtose e de Obliquidade Estatística e o aumento da profundidade p da trinca transversal. Para o caso dos eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos, verifica-se uma estreita ligação entre a elevação dos valores do indicador estatístico Desvio Mediano Absoluto e o aumento da profundidade p da trinca transversal. O capítulo apresenta, também, as estimativas da propagação da trinca transversal, por meio de aproximações, para as duas etapas de análises.

O capítulo cinco aborda a conclusão do estudo e algumas perspectivas para a continuidade dos estudos relacionados ao fenômeno de EA. Verifica-se que a presença de uma trinca transversal torna-se uma fonte potencial de sinais de EA em eixos estacionários e rotativos. Verifica-se, também, que as ondas de EA, geradas por este tipo de fonte, se propagam através do material e podem ser captadas por sensores acústicos posicionados em pontos específicos do sistema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos básicos necessários ao entendimento do desenvolvimento deste estudo. O texto apresenta uma análise detalhada da dinâmica de rotores, com foco no efeito de abertura e fechamento de uma trinca transversal em eixo rotativos, conhecido como “Breathing Effect”. O fenômeno da Emissão Acústica também é detalhado neste capítulo. A energia, a amplitude do sinal, as principais faixas de frequências que caracterizam o fenômeno e os principais desafios para a utilização da técnica de EA são apresentados. O capítulo apresenta, também, os fundamentos da análise por Wavelets, as transformadas contínua e discreta de Wavelet e a sua capacidade de decomposição de sinais de EA.

2.1. A presença de trincas em eixos rotativos: O movimento de abertura e fechamento de uma trinca transversal (Breathing Effect)

A influência de uma trinca num eixo rotativo tem sido foco de vários estudos como Cheng e al (2010), Nunes (2007), Sinous (2009) e Sinous e Lees (2006). De acordo com Sinous e Lees (2005), de maneira geral, existem dois métodos de análise capazes de identificar a presença de uma trinca em rotores. O primeiro se baseia no fato de que a presença de uma trinca irá reduzir, localmente, a rigidez K do rotor e assim a sua frequência natural ω_n também diminuirá. Assim, um aumento da razão μ entre a profundidade p de uma trinca transversal e o raio r do eixo do rotor se traduzirá numa diminuição de ω_n . A Figura 1 mostra a razão μ .

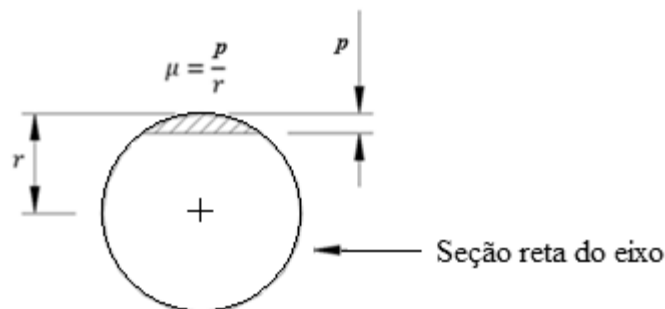


Figura 1 – Área de seção reta do eixo e a razão μ entre p e r .

A Tabela 1 mostra a variação de ω_n verificada por Sinous e Lees (2005) em simulações realizadas para diferentes valores da razão μ .

Tabela 1 – Variação de ω_n em função da razão μ , adaptada de Sinou e Lees (2005).

ω_n	$\mu = 0,00$	$\mu = 0,25$	$\mu = 0,50$	$\mu = 0,75$	$\mu = 1,0$
ω_1	16,597	16,581	16,549	16,479	16,257
ω_2	65,367	65,290	65,131	64,787	63,755
ω_3	176,038	176,032	176,020	176,012	176,011

Ainda de acordo com Sinou e Lees (2005), o segundo método de análise para se detectar a presença de uma trinca transversal é baseado na modificação da resposta dinâmica do rotor. Saavedra e Cuitiño (2002) demonstram que para um eixo rotativo com velocidades moderadas, abaixo da primeira velocidade crítica, e considerando o carregamento de seu próprio peso sendo muito maior que o efeito do desbalanceamento, haverá a abertura e o fechamento da trinca durante uma revolução. Este fenômeno dinâmico é conhecido como “Breathing Effect” e é representado na Figura 2, seguindo o sentido anti-horário de rotação.

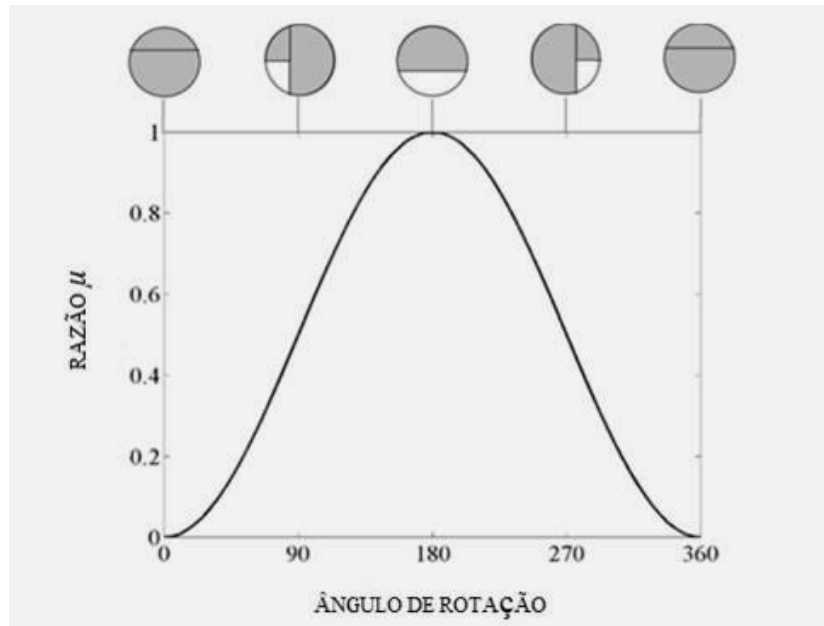


Figura 2 – Movimento de abertura e fechamento de uma trinca transversal durante uma revolução do eixo seguindo o sentido anti-horário de rotação, Sinou e Lees (2005).

2.2. O Fenômeno de Emissão Acústica

Baranov et al.(2007) mostram que os primeiros estudos relacionados aos sinais de EA remontam a meados do Século XIX. Neste período as análises eram realizadas por meio da audição do processo de deformação de materiais, entretanto esta técnica não era costumeiramente empregada. Somente após a primeira metade do Século XX houve o aprofundamento da metodologia de estudos e do desenvolvimento de ferramentas para análise destes tipos sinais. Ao fim daquele mesmo século o fenômeno passou a ser caracterizado em estudos para diagnósticos de atrito entre materiais.

Kaiser (1950) foi o pioneiro nos estudos dos sinais de EA. Em sua tese foram publicadas duas conclusões importantes. A primeira diz que todo material submetido a esforços emitirá sinais de EA. A segunda atesta que, após cessado o sinal de EA, devido a um dado carregamento em um material, uma nova emissão de sinal irá ocorrer, somente, quando o nível de tensões seja superior àquele que gerou o sinal anterior. Este efeito é conhecido como “Efeito Kaiser”.

Heiple e Carpenter (1987) afirmam que o processo de geração de energia em uma fonte de EA é consequência da presença de discordâncias na estrutura do material, as quais produzem um campo de tensões na rede cristalina. Existem três mecanismos básicos capazes de gerar energia para os sinais de EA:

- i. O movimento de uma discordância;
- ii. A aceleração ou desaceleração do movimento de uma discordância; e
- iii. O desaparecimento de uma discordância;

De acordo com Grosse et al. (2008) a técnica de EA é capaz de detectar os estágios iniciais do desenvolvimento de trincas, pois sua sensibilidade permite captar ondas mecânicas de EA que se irradiam pela estrutura do material na região do defeito.

Baranov et al. (2007) ainda definem o fenômeno da EA como a propagação de uma onda, do tipo mecânica, produzida pelo rearranjo da estrutura interna do material devido à tensão localizada. A emissão de ondas acústicas ocorre tanto a nível microestrutural, pelo movimento de discordâncias, como a nível macroestrutural, pelo atrito entre superfícies ou pelas falhas estruturais. O autor chama de “*evento*” ao processo físico que ocorre estruturalmente no material.

Rahman et al. (2008) afirmam que os pulsos de EA, com amplitudes acima de um valor limite, são um parâmetro importante para representar falhas. Sua metodologia de análise das características de um pulso de EA mostrou-se efetiva para detectar danos iniciais em mancais de rolamentos esféricos.

Mathis e Chmelik (2012) dividem os sinais de EA em contínuos e descontínuos. No caso dos sinais contínuos, a sua amplitude permanece acima de um valor limite durante um período de amostragem relativamente longo. Este tipo de sinal está diretamente ligado aos mecanismos de deformação plástica às tensões internas. No caso dos sinais descontínuos, estes aparecem nitidamente como picos de amplitude, no domínio do tempo. Este tipo de sinal está diretamente ligado ao início e à propagação de trincas e a processos de corrosão.

Stephens e Pollock (1971) afirmam que a geração de energia em sinais descontínuos de EA é muito maior se comparada à energia dos sinais contínuos. Eles descrevem em seus estudos a energia contida em um pulso descontínuo em sinais de EA.

De acordo com Sikorska and Mba (2008) a Emissão Acústica é um fenômeno resultante da liberação rápida de energia, a qual se propaga em forma de ondas mecânicas até a superfície do material, seja este sólido ou fluido. Eles consideram como fontes típicas de EA a deformação

plástica, as micro fraturas, a cavitação e o atrito. Geralmente as amplitudes dos sinais de EA variam de poucos microvolts até dezenas de milivolts e suas frequências variam de dezenas de kHz a poucos MHz.

Sikorski (2012) mostra que a faixa de frequência mais comum em sinais de EA está compreendida de 100 kHz à 300 kHz e que os sensores de EA podem detectar emissões referentes a movimentos da ordem de 10^{-13} m. Al-Balushi et al. (2010) afirmam que os sinais de EA surgem de fenômenos que produzem energia, em forma de ondas mecânicas, as quais se propagam por meios sólidos ou fluidos. Eles afirmam também que o conteúdo característico de frequências de EA está na faixa compreendida de 100 kHz à 1 MHz.

Segundo Mohanty (2015), materiais sob tensões, como as que são gerados pelas vibrações torcionais ou pelo movimento de abertura e fechamento de uma trinca, durante uma revolução de um eixo, liberam sinais com frequências de até 2 MHz.

Miller e McIntire (1987) mostram ser bastante diferentes as características de sinais contínuos de EA, produzidos durante o corte de metais ou pelo atrito de rolamentos esféricos se comparados com os sinais espontâneos produzidos pela liberação de energia durante o desenvolvimento de trincas.

Kline, Green e Palmer (1981) afirmam que materiais submetidos a tensões sofrem alterações em sua microestrutura, sendo estas capazes de gerar pequenos pulsos de energia, os quais são conhecidos como ondas elásticas de EA. Estas ondas se propagam através do material e podem ser detectadas na superfície.

Egle e Tatro (1967) definem o termo Emissão Acústica como sendo um pulso de baixíssimo nível sonoro, o qual ocorre em alguns materiais submetidos a um campo de tensões crescente. Este pulso de EA gera um par de ondas planas e longitudinais, que percorrem o material, em sentidos opostos, partindo da fonte. Estas duas ondas possuem formas similares, mas não possuem, necessariamente, a mesma magnitude, pois cada onda é parcialmente transmitida e refletida no interior do material. Eles consideram que cada onda encontra seções de transição diferentes em seus percursos.

Baranov et al. (2007) também afirmam que um único evento conduz apenas a uma única deformação, a qual apresenta quantidade de energia tão insignificante que não pode ser captada. Entretanto, uma sequência de eventos poderá conduzir a uma quantidade satisfatória de energia liberada. Eles mostram que uma onda de EA pode ser classificada como contínua ou discreta. Por onda contínua entende-se a onda gerada por um número elevado de eventos, porém com pouca

liberação de energia. Desta forma não ocorrem variações significantes nas características do sinal no tempo.

Por onda discreta entende-se a onda também gerada por um grande número de eventos, porém apresenta quantidade de energia maior se comparada à quantidade de energia das ondas contínuas. Numa onda discreta ocorrem grandes variações nas características do sinal em um curto espaço de tempo. Uma onda discreta apresenta grande amplitude de sinal. Na realidade os dois tipos de onda ocorrem simultaneamente. Como exemplo, o crescimento de uma trinca em um metal apresenta períodos de estabilidade, quando os esforços envolvidos não apresentam capacidade de alterar plasticamente a região da trinca. O sinal gerado neste período representa uma onda contínua de EA. Quando os esforços atingem valores capazes de alterar plasticamente a região da trinca, esta área sofre aumento a uma velocidade próxima à do som. O sinal gerado neste período representa uma onda discreta de EA. Uma onda contínua de EA caracteriza, normalmente, a presença de deformações plásticas. Já uma onda discreta de EA está relacionada ao crescimento de trincas.

Pekeris e Lifson (1957) mostram que uma fonte de Emissão Acústica produz ondas de compressão P e de cisalhamento S . Quando estas ondas tocam a superfície do material serão parcialmente convertidas no outro tipo de onda, a qual irá, por meio dos fenômenos de difração ou reflexão, ser refletida para o interior do material ou percorrer a sua superfície, com velocidades diferentes da velocidade de incidência. As ondas de compressão apresentam altas velocidades de propagação e são as primeiras a chegarem à superfície. As ondas de cisalhamento apresentam menores velocidades de propagação, o que se deve à constante elástica do material. A Figura 3 representa o fenômeno para uma onda incidente S .

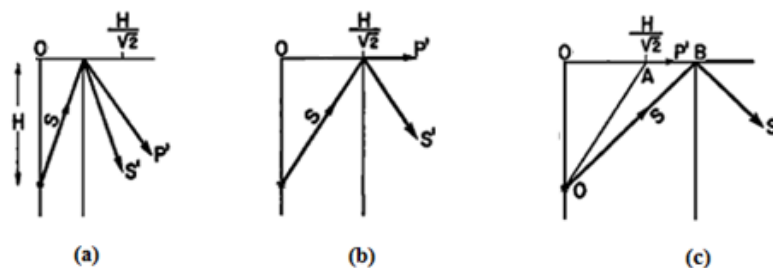


Figura 3 – Representação da propagação de uma onda de cisalhamento oriunda de uma fonte de EA, adaptada de Pekeris e Lifson (1957).

Na Figura 3, H representa a profundidade da fonte de EA e O representa um ponto, na superfície do material, verticalmente acima da fonte de EA. Na Figura 3(a), o ponto de incidência ocorre a uma distância inferior ao valor $H/\sqrt{2}$, neste caso a onda S é totalmente refletida e se divide em outras duas ondas, uma de cisalhamento S' e uma de compressão P' . Na Figura 3(b), o ponto de incidência ocorre a uma distância igual ao valor $H/\sqrt{2}$, neste caso a onda S é parcialmente

refletida em uma onda S' e parcialmente difratada em uma onda P' . Na Figura 3(c), o ponto de incidência ocorre a uma distância superior ao valor $H/\sqrt{2}$, no ponto B , neste caso a onda S é totalmente refletida em uma onda S' . Pelo mesmo ponto B da superfície, ocorrerá a propagação de uma onda P' , oriunda da difração anterior de uma onda S em uma onda P' a uma distância $H/\sqrt{2}$.

Pekeris e Lifson (1957) ainda demonstram a existência das ondas de Rayleigh. Estas ondas, também de origens compressivas, se propagam realizando movimentos elípticos movendo-se horizontalmente, logo abaixo da superfície do material. A Figura 4 mostra o fenômeno na superfície de um cristal piezoelétrico. As amplitudes deste tipo de onda decaem exponencialmente com a profundidade.

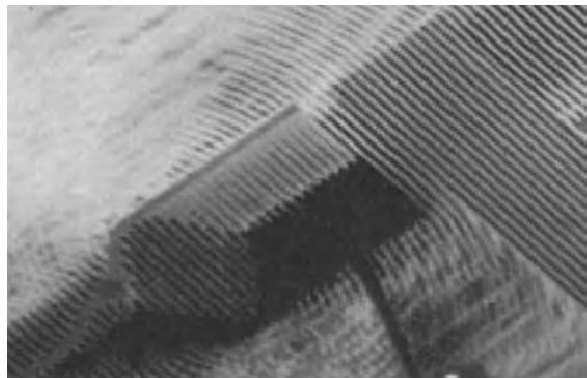


Figura 4 – Propagação de ondas de Rayleigh na superfície de um cristal piezoelétrico. Imagem captada por Microscópio de Varredura Eletrônica. Veith (1985).

Wadley, Scruby e Speake (1980) mostram que os pulsos de EA são gerados durante variações nos campos de tensão no interior do material. Para uma certa variação de carregamento externo no material surgirão efeitos como deformações e fraturas, os quais são formas de fontes de sinais de EA. Os autores também afirmam que, de maneira geral, as fontes de EA podem ser classificadas em dois tipos. O primeiro considera a fonte como um ponto de geração de Energia Potencial Elástica e usa parâmetros tais como o carregamento e as tensões para obter uma solução estática. A este modelo de fonte dá-se o nome de “Estático”. Este modelo considera, ainda, que a energia potencial elástica produzida por uma fonte não é totalmente transformada em um pulso de EA, ou seja, ocorre uma partição desta energia, sendo que uma quantidade contribui para o aumento de tensões no material, por meio de discordâncias. Outra contribuirá com o início de novas trincas. Outra, ainda, será convertida em calor. Apenas uma fração da energia potencial elástica total se transforma em um pulso de EA. O segundo tipo, o qual foi desenvolvido por Pollok (1973), considera a fonte de EA como um sistema massa - mola. Este modelo de fonte é chamado de “Dinâmico”, sendo extremamente mais simples que o primeiro. A Figura 5 representa o fenômeno.

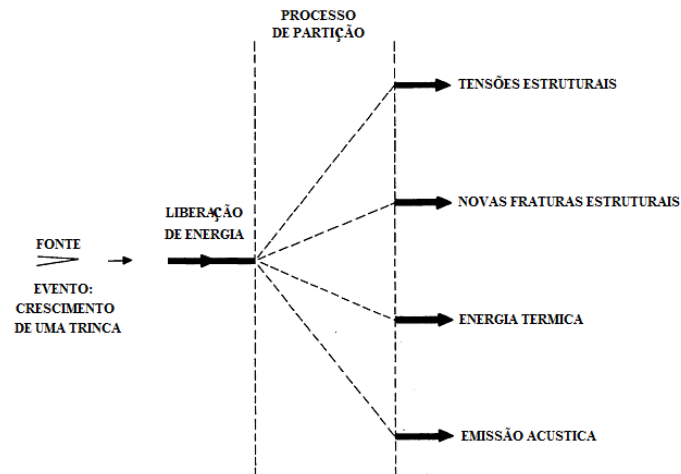


Figura 5 – Processo de partição da energia elástica em uma fonte estática. Adaptado de Wadley, Scruby, e Speake (1980).

Sikorska e Mba (2008) relacionam em seus estudos alguns desafios e obstáculos encontrados na utilização da técnica de Emissão Acústica. Eles mostram que a utilização deste método não destrutivo de análise ainda é pouco empregada pela indústria como ferramenta de diagnóstico do comportamento de máquinas rotativas, embora tenha ocorrido grande desenvolvimento na pesquisa relacionada ao tema, nos últimos vinte anos. Os autores relacionam o pequeno índice de utilização da técnica à carência de literatura que aborde os desafios, obstáculos e limitações do método, os quais devem ser compreendidos antes de sua aplicação. Eles destacam os seguintes aspectos:

- i. Calibração do sensor: Os sensores utilizados na captação de sinais de EA devem possuir certificação de laboratórios com reconhecimento internacional. As especificações técnicas, tais como a curva de resposta em frequência, são fornecidas juntamente com cada sensor. A curva de resposta em frequência é específica para cada sensor, sendo que dois sensores do mesmo modelo apresentarão uma ligeira diferença nas respostas. Dois sensores de diferentes modelos apresentarão significativas variações em suas respostas.
- ii. Hardware: Os sistemas comerciais de análises de EA apresentam desempenhos satisfatórios de aquisição, caracterização e armazenamento destes sinais para pequenos períodos de tempo. Apresentam ainda amplificadores, filtros e baterias em suas estruturas. Equipamentos portáteis de um canal têm sido empregados com sucesso na indústria. Eles extraem dados de EA podendo utilizar o processamento analógico ou digital de sinais.
- iii. Software: Os softwares utilizados para as análises de EA são, muitas vezes, inadequados para gerar gráficos e gerenciar dados por longos períodos de tempo. Um método alternativo torna-se necessário para o gerenciamento de um elevado número de amostras.

iv. Sinais não estacionários: Smith (1999) define como sinais não estacionários aqueles em que suas características se alteram constantemente. Sikorska e Mba (2008) afirmam que os sinais de EA, oriundos de maquinaria rotativa, podem ser do tipo não estacionários. Isto significa que maior será a probabilidade destes parâmetros não serem confiáveis. O método mais eficiente para analisar estes tipos de sinais é aplicar a Transformada Discreta de Wavelet.

v. Ruído: Uma grande variedade de técnicas de tratamento antirruído vem se desenvolvendo nos últimos vinte anos. O grau de sucesso de determinada técnica varia de acordo com cada aplicação em sinais de EA. Isto se deve ao fato de que aquilo que é considerado ruído e o que é considerado sinal genuíno de EA apresenta enorme diferença de um processo para outro. Desta forma é impossível desenvolver uma técnica que atenda a todas as aplicações. Durante a fase de coleta de dados de EA, o ruído pode ser gerado por componentes eletrônicos, funcionamento de válvulas, interferências eletromagnética e de rádio. As técnicas de tratamento antirruído como a Transformada discreta de Wavelet e a filtragem de Swansong são bastante efetivas nas aplicações em sinais de EA.

2.3. A Transformada de Wavelet

A transformada de Wavelet tem sido considerada uma eficiente ferramenta de análise de sinais de EA. Ematsu (2008) afirma que as Wavelets têm sido aplicadas a diversas áreas da ciência. O autor mostra que, na história da matemática, a análise pelo método de Wavelet é bastante diversificada em suas origens. A primeira menção ao termo Wavelet foi feita por Haar (1910). Grossmann e Morlet (1984) apresentaram, pela primeira vez, o conceito matemático da transformada de Wavelet.

Addison (2002) mostra que esta metodologia teve seu desenvolvimento durante a década de 1990, com um grande aumento de publicações científicas acerca do tema, como mostra a Figura 6. O grande atrativo desta metodologia se traduz em sua eficiente capacidade produzir análise, simultaneamente, nos domínios do tempo e da frequência. Tradicionalmente os sinais eram analisados, separadamente, em um ou outro domínio, por meio da Transformada de Fourier.

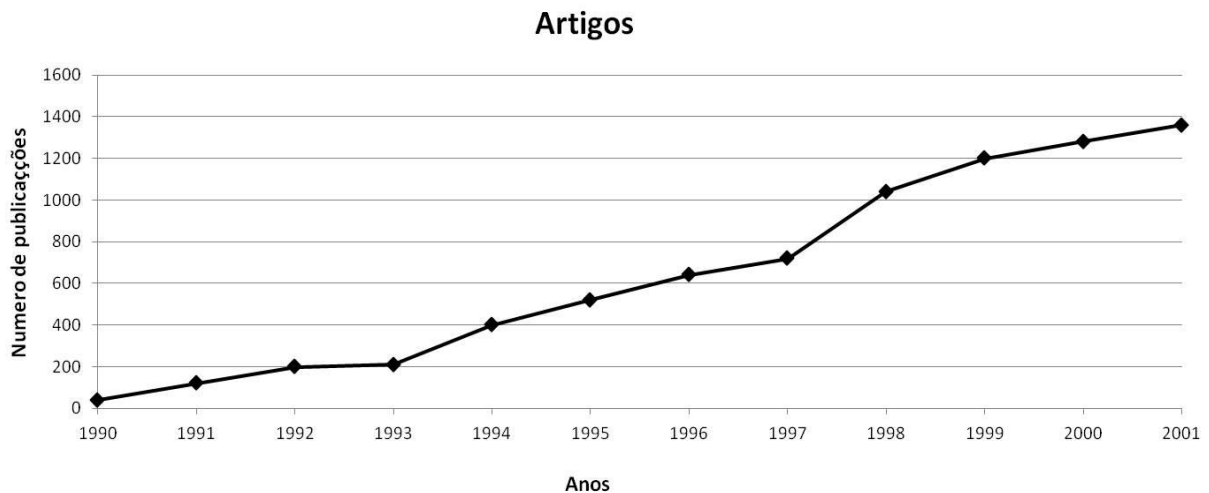


Figura 6 – Aumento de Publicações Científicas ligadas à pesquisa com Wavelets, adaptada de Addison (2002).

Merry (2005) afirma que a transformada de Fourier é a mais utilizada na análise de sinais. Este método, apresentado em 1807, pelo matemático francês Joseph Fourier, representa uma função periódica por meio de uma soma infinita de exponenciais complexas, ou seja, a transformada de Fourier decompõe o sinal em funções trigonométricas ortogonais básicas. A Figura 7 apresenta um sinal $x(t)$ no domínio do tempo.

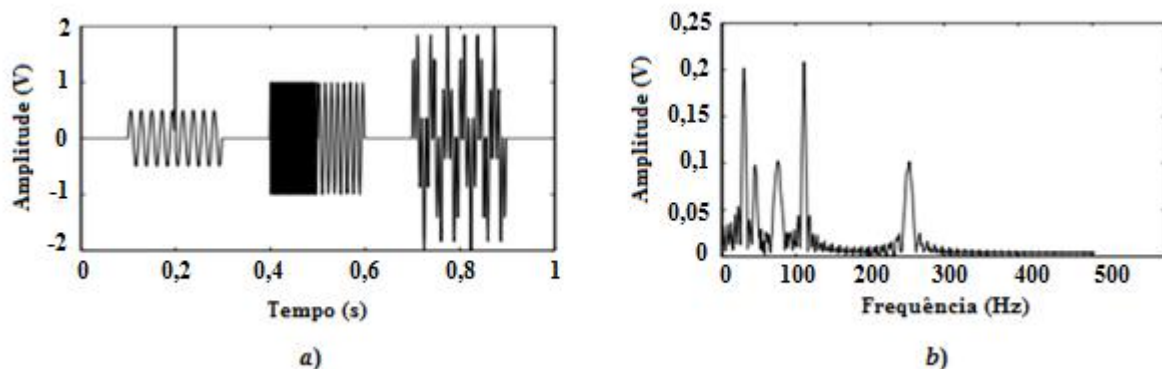


Figura 7 – Em a) o sinal captado $x(t)$ no domínio do tempo e em b) a FFT do sinal $x(t)$, adaptada de Merry (2005).

A Figura 7 a) mostra que o sinal $x(t)$ apresenta uma senóide de 45 Hz no intervalo de tempo de 0,1 s a 0,3 s e que no tempo 0,2 s ocorre um pulso. No intervalo de tempo de 0,4 s a 0,5 s o sinal passa a apresentar uma senóide de 250 Hz, no intervalo de 0,5 s a 0,6 s este valor muda para 75 Hz e no intervalo de 0,7 s a 0,9 s ocorre uma superposição de duas senóides de 30 Hz e 110 Hz. A Figura 7 b) mostra a FFT do sinal $x(t)$. É possível perceber cinco picos de frequências com valores de 30 Hz, 45 Hz, 75 Hz, 110 Hz e 250 Hz, entretanto as informações sobre o momento em que eles ocorrem foi completamente perdida após a aplicação da Transformada de Fourier ao sinal.

Esta forma de análise acarreta desconhecimento das informações de um domínio no outro, ou seja, as informações do domínio do tempo são “perdidas” no domínio da frequência e vice-versa. Como forma de sobrepor-se às limitações da análise de Fourier, Gabor (1946) propõe uma adaptação à transformada de Fourier, onde um sinal captado $x(t)$ pode ser analisado em pequenas seções num certo intervalo de tempo. A Figura 8 ilustra a teoria.

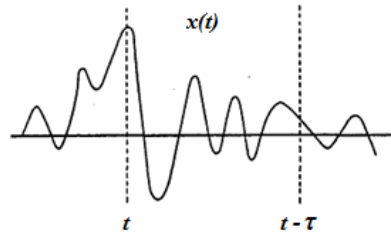


Figura 8 – Seção de análise do sinal e informações de frequência na análise no domínio do tempo, adaptado de Gabor (1946).

A Figura 8 mostra a técnica proposta por Gabor, a qual se traduz em um tipo de janelamento, conhecido por Short-Time Fourier Transform (STFT). Por meio desta técnica um sinal captado $x(t)$ é analisado por uma função que opera, simultaneamente, nos domínios do tempo e da frequência.

Merry (2005) afirma, ainda, que o desempenho deste método depende principalmente da escolha da largura do janelamento. A Figura 9 mostra a STFT do sinal $x(t)$.

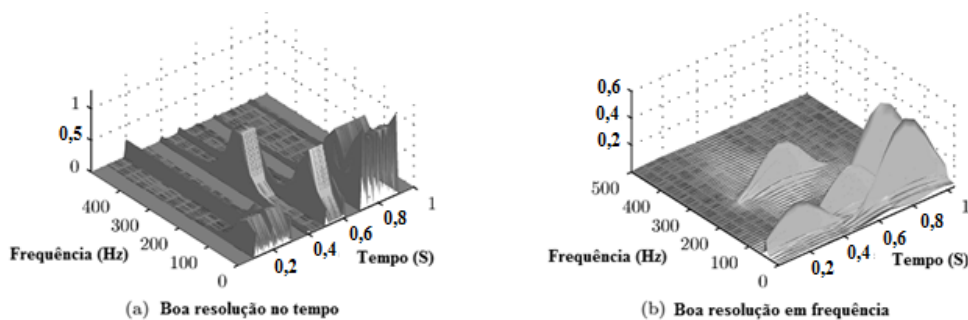


Figura 9 – STFT do sinal $x(t)$. (a) Janelamento de 0,03 s e (b) Janelamento de 0,6 s, adaptada de Merry (2005).

A Figura 9 a) mostra que, com um janelamento de 0,03 s, ocorre boa resolução no domínio do tempo, entretanto o domínio da frequência apresenta-se comprometido, não havendo boa definição em seu eixo representativo.

A Figura 9 b) mostra que, com um janelamento de 0,6 s, ocorre boa resolução nos valores das frequências presentes no sinal, entretanto o domínio do tempo apresenta-se comprometido, pois existe uma sobreposição das frequências neste domínio.

A Figura 10 mostra que, com um janelamento de 0,15 seg., ocorre boa resolução em ambos os domínios.

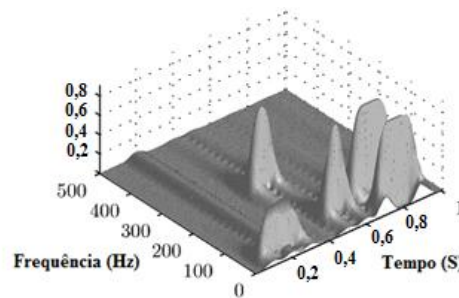


Figura 10 – STFT do sinal $x(t)$ com janelamento de 0.15 s, adaptada de Merry (2005).

Fica evidente que esta metodologia apresenta, ainda, uma desvantagem na análise de sinais, a qual se manifesta pela largura fixa da janela, ou seja, ocorre deficiência na precisão durante a análise em um domínio e a reprodução das informações no outro.

As componentes de baixas frequências apresentam maiores períodos de tempo, logo tornam-se necessários janelamentos mais largos. As componentes de altas frequências aparecem como picos de curtíssimos intervalos de tempo, logo tornam-se necessários janelamentos mais estreitos. Quanto mais estreita for a largura da janela, maior será o esforço computacional para a análise do sinal.

Lima (2002) afirma que as transformadas de Wavelet podem ser vistas como mecanismos para decompor os sinais em suas partes constituintes. Desta forma, o sinal pode ser analisado em diferentes valores de frequências e com resoluções específicas de tempo. O método é baseado nos princípios de dilatação e translação de uma função Wavelet sobreposta a um sinal captado $x(t)$.

Addison (2002) define uma Wavelet contínua como uma função de onda $\psi(f)$ a qual apresenta forma específica e satisfaz alguns critérios matemáticos. Estas funções são controladas de duas maneiras. Elas podem ser dilatadas ou comprimidas (Controle de Escala) em um ponto específico do tempo. Elas podem, também, ser movimentadas através do tempo (Controle de Translação).

A Transformada de Wavelet se traduz na convolução entre uma função de onda Wavelet $\psi(f)$ e o sinal captado $x(t)$. A transformada quantifica o grau de correlação, ou seja, o grau de semelhança, entre a função de onda Wavelet e o sinal captado, em determinado ponto no tempo.

A Figura 11 apresenta os controles de escala e de translação para uma Wavelet com a função de onda do tipo “Chapéu Mexicano”.

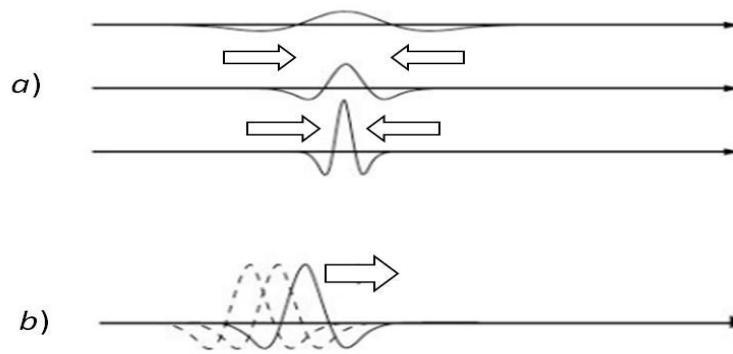


Figura 11 – Em *a*) o controle de dilatação e em *b*) o controle de translação, adaptada de Addison (2002).

Se a forma da função de onda Wavelet apresenta boa relação com a forma de onda do sinal captado, em uma determinada escala a e em um determinado ponto de localização b no tempo, haverá um valor elevado para a convolução, ou seja, haverá um valor elevado de correlação.

Caso a forma da função de onda Wavelet não apresente boa relação com a forma de onda do sinal captado, haverá um valor baixo ou nulo para a convolução. A Figura 12 apresenta a comparação entre a forma da função de onda Wavelet do tipo “Chapéu Mexicano” e a forma do sinal captado qualquer.

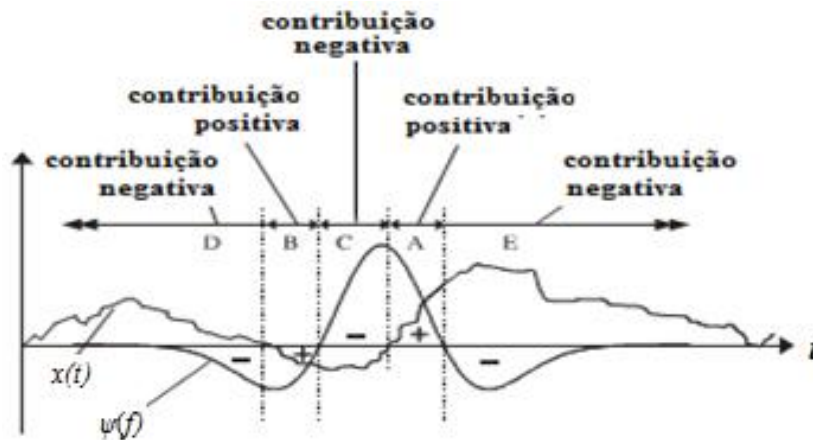


Figura 12 – Comparação entre uma Wavelet mãe e um sinal arbitrário $x(t)$. Adaptada de Addison (2002).

Os valores de escala e de translação da função de onda Wavelet são então alocados em um sistema onde estão diretamente relacionados aos valores quantificados pela correlação entre $\psi(f)$ e $x(t)$.

A Figura 13 mostra o processo de quantificação da correlação entre uma função de onda Wavelet e um sinal captado qualquer. Na figura $\psi(f)$ apresenta o fator de dilatação a em função do período P do sinal captado $x(t)$.

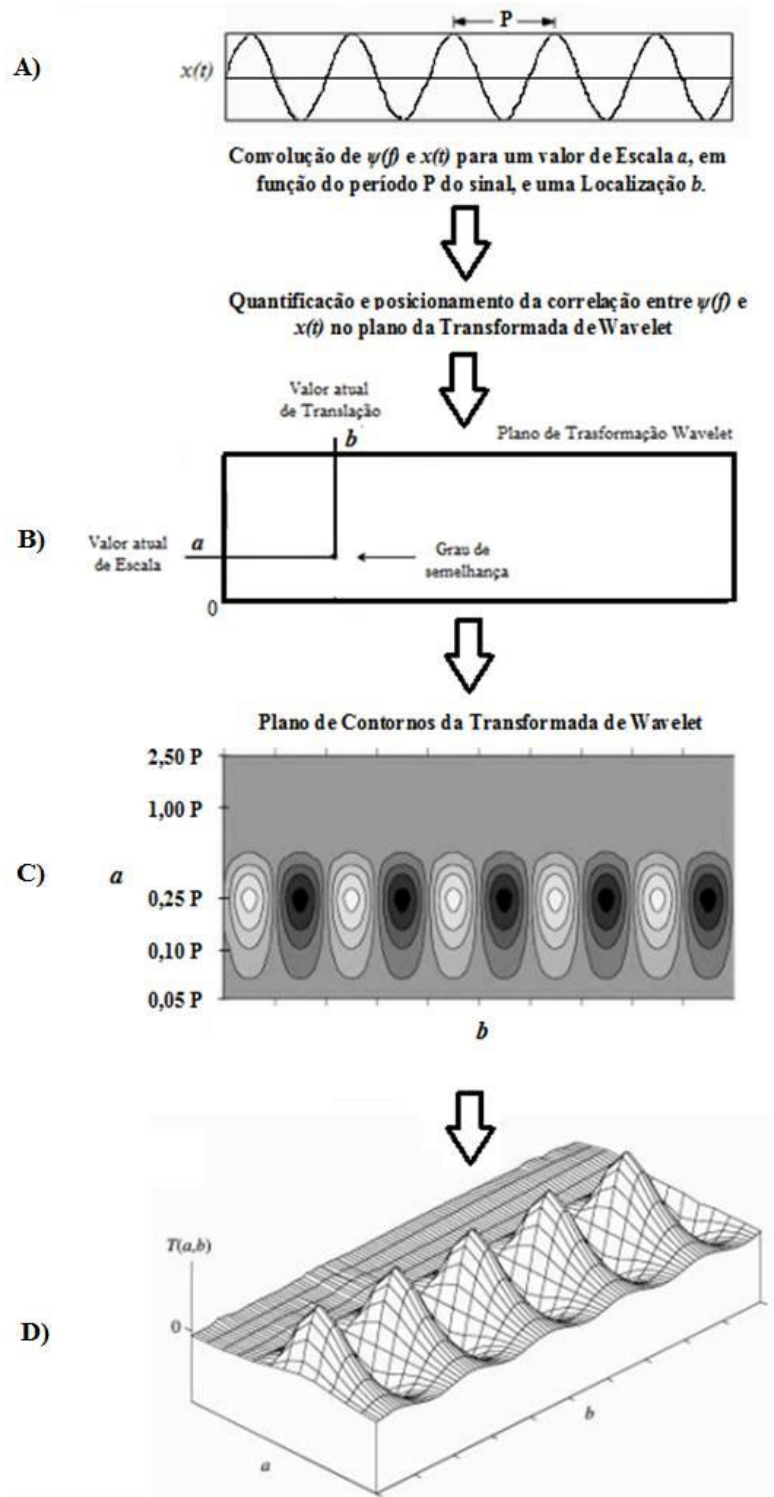


Figura 13 – Quantificação do grau de semelhança entre uma forma de onda Wavelet $\psi(f)$ e um sinal captado qualquer $x(t)$. Em A) o sinal captado. Em B) o posicionamento da correlação. Em C) a quantificação por meio da gradação de cores e em D) a vista isométrica do Plano de Contornos da Transformação. Adaptada de Addison (2002).

Desta forma, ainda de acordo com Addison (2002), a Transformada de Wavelet de um sinal captado qualquer $x(t)$ pode ser representada pela Equação 1, onde $1/\sqrt{a}$ é o termo de normalização da energia, o que garante que cada Wavelet, em cada Escala, tenha a mesma energia.

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad \text{Eq. 1}$$

2.3.1. A Transformada Discreta de Wavelet

Ainda de acordo com Addison (2002), na Transformada Discreta de Wavelet, os parâmetros a e b são considerados apenas para valores discretizados de dilatação e translação da função de onda Wavelet. O parâmetro a é logaritmicamente discretizado, na forma de uma potência de base dois, e se relaciona, proporcionalmente, à distância entre duas localizações do parâmetro b . Assim a Equação 1 assume a sua forma discretizada como na Equação 2.

$$T(m, n) = \frac{1}{\sqrt{\frac{m}{a_0^2}}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* (a_0^{-m} t - nb_0) dt \quad \text{Eq. 2}$$

Onde a_0 é um parâmetro fixo de dilatação, ajustado para valores maiores que um e b_0 é o parâmetro de localização, sendo maior que zero. Os novos parâmetros m e n estão contidos no conjunto dos números inteiros, positivos e negativos, e controlam a dilatação e a translação, respectivamente, em uma transformação discreta. Desta forma, numa Wavelet discreta o passo de translação Δb está diretamente relacionado à dilatação a_0^m por meio da Equação 3. Os valores da Transformada Discreta de Wavelet $T(m, n)$ são conhecidos como coeficientes de detalhes.

$$\Delta b = b_0 a_0^m \quad \text{Eq. 3}$$

Sawicki, Sen e Litak (2009) afirmam que, por meio da utilização da Transformada Discreta de Wavelet, um sinal captado qualquer $x(t)$ pode ser decomposto em vários níveis de análise. No primeiro nível, $x(t)$ será dividido em coeficientes de Aproximação A_1 e em coeficientes de Detalhes D_1 . O coeficiente A_1 é novamente decomposto, formando o segundo nível de coeficientes de Aproximação A_2 e de Detalhes D_2 e assim por diante. A Figura 14 mostra a decomposição.

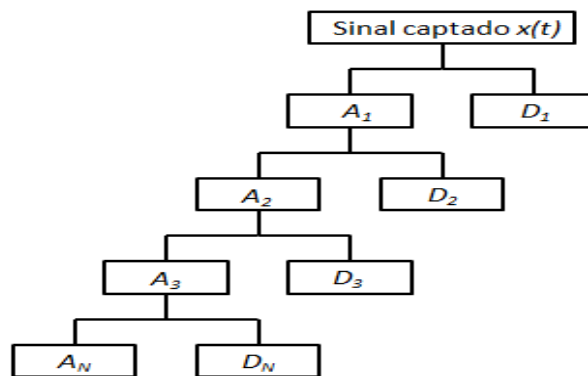


Figura 14 – Decomposição de um sinal captado qualquer $x(t)$ em coeficientes de Aproximação A_N e de Detalhes D_N .

Ainda de acordo com Sawicki, Sen e Litak (2009), o coeficiente D_1 registrará a faixa de frequências mais elevadas do sinal $x(t)$. O coeficiente D_2 registrará a faixa de frequências com metade do valor de D_1 e assim por diante, ou seja, se a frequência de amostragem do sinal $x(t)$ é f_s então o coeficiente A_N registrará a faixa de frequências entre zero e $\frac{f_s}{2^{N+1}}$ Hz e o coeficiente D_N registrará a faixa de frequências entre $\frac{f_s}{2^{N+1}}$ Hz e $\frac{f_s}{2^N}$ Hz.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a descrição de equipamentos, os softwares e a metodologia aplicada neste estudo. A Bancada Compacta de Testes Dinâmicos e o sistema de aquisição de dados são detalhados no texto. O texto apresenta, também, a descrição dos procedimentos adotados durante as análises de eixos estacionários e rotativos e dos principais desafios enfrentados para eliminar os efeitos indesejados das interferências eletromagnéticas.

3.1. Descrição dos eixos

Os eixos foram fabricados, por meio de usinagem convencional, a partir de uma barra sextavada de aço ABNT 1020, com diâmetro de 5/8". Cada eixo apresentava comprimento de 840 mm e 15 mm de diâmetro. A Figura 15 apresenta o modelo do eixo com a simulação da trinca transversal, na região central do eixo, e a sua profundidade p . As trincas transversais foram introduzidas nos Eixos 2 à 6 por meio de fresamento e seguem uma razão μ , crescente, entre os valores de suas profundidades p e o raio r da seção reta de cada eixo. A Tabela 2 apresenta os valores de profundidade de cada trinca em relação ao eixo.

Tabela 2 – Profundidade da trinca transversal em cada eixo.

Eixo	Profundidade p (mm)
1	0,00
2	1,50
3	3,00
4	4,50
5	6,00
6	7,50

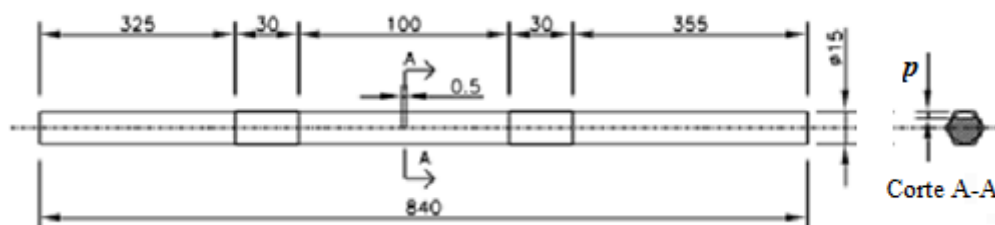


Figura 15 – Desenho do eixo utilizado nos ensaios, Pimentel Junior et al (2014).

3.2. Descrição do sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados constituiu-se de um sensor de EA, cabos de transmissão de sinal e um console PXI 1042, o qual apresenta interface com o programa Lab View.

a) Sensor de EA

Um sensor PAC, modelo S9208, foi utilizado para captar sinais de EA no suporte do mancal hidrodinâmico esquerdo. Este tipo de sensor foi desenvolvido para aplicações em estudos de EA na superfície dos materiais. Sua estrutura é de aço inoxidável e sua faixa de operação está compreendida de 20 kHz à 1.000 kHz. Sua frequência de ressonância de 500 kHz. O sensor também possui circuito interno de pré-amplificação 2/4/6.

b) Transmissão de sinais

Dois tipos de cabo coaxiais foram utilizados para conectar o sensor S9208 ao console PXI 1042. Um cabo coaxial PCB, série 002, com 3 m de comprimento, com conector 10 - 32 e um plug BNC fêmea. Acoplado ao cabo série 002, utilizou-se um cabo coaxial PCB, série 003, com 0,3 m de comprimento, com conector BNC macho e conector SMB. O conector 10 - 32 do primeiro cabo conectava-se ao sensor acústico e o conector SMB do segundo cabo conectava-se à placa PCI TB 2708.

c) Console PXI 1042

O console PXI 1042 utilizado para aquisição de sinais é composto por uma placa controladora PXI 8106 com processador Dual-Core Intel Core 2 Duo Dual-channel 667 MHz DDR2 RAM com 512 MB. Apresenta também uma Placa PCI TB 2708, conectada a uma placa PXI 6115, para aquisição de sinais com quatro canais, os quais possuem frequência de aquisição de até 10 MHz. Por meio deste conjunto é possível utilizar as ferramentas do programa Lab View para análise de sinais em tempo real.

3.3. Metodologia

Seis eixos de aço ABNT 1020 foram utilizados. As simulações da trinca transversal foram introduzidas, por meio de fresamento, em cinco dos seis eixos. Estas simulações tiveram o propósito de servirem como fonte de sinais de Emissões Acústicas. A Figura 16 apresenta os cinco eixos e suas simulações de trincas transversais.



Figura 16 – Simulações de trinca transversal.

A metodologia se desenvolveu em duas etapas distintas. Na primeira, os sinais de EA foram captados de seis eixos estacionários. Nesta etapa cada um dos eixos foi suspenso por dois fios de nylon em suas extremidades, atendendo a condição Livre – Livre, e sofria cinco batidas de uma haste metálica, a qual era suspensa por meio de um aparato experimental.

Na segunda etapa foram analisados sinais de EA em seis eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos. Nesta etapa cada um dos seis eixos operava em quatro velocidades específicas, sendo uma subcrítica e três supercríticas. Estas velocidades eram geradas por meio de uma Bancada Compacta de Testes Dinâmicos. O Eixo 1 foi utilizado como eixo de controle em ambas as etapas e não possuía qualquer simulação de trinca. Os Eixos 2 à 6 apresentavam uma razão μ , crescente, entre a profundidade p da trinca transversal e o raio r de sua seção reta.

3.3.1. Eixos estacionários

a) Montagem do aparato experimental

Os eixos possuíam a condição Livre - Livre nas extremidades. Esta condição foi simulada pendurando-se cada um dos eixos pelas suas extremidades. Utilizaram-se dois fios de nylon, com 0,8 mm de diâmetro e 1,20 m de comprimento.

O sensor de EA foi fixado a uma base metálica cilíndrica, também usinada em aço ABNT 1020, por meio de fita adesiva, sendo que graxa grafitada foi usada como meio de contato na montagem. A base cilíndrica possuía furação transversal com 15 mm de diâmetro, o que permitia seu rápido acoplamento aos eixos. O acoplamento se dava por meio de um parafuso na parte inferior da base. Optou-se por fixá-lo à extremidade direita. A Figura 17 apresenta o esquema da montagem.

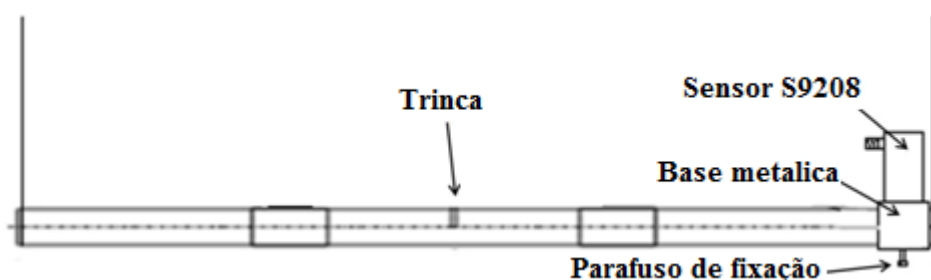


Figura 17 – Esquema de montagem do conjunto de aquisição de sinais de EA, Pimentel Junior, Bolsoni e Faria (2015).

Os eixos sofreram batidas por meio de uma haste cilíndrica de aço. A haste, também suspensa por fio de nylon de 0,8 mm de diâmetro e 1 m de comprimento, realizava deslocamento pendular em direção ao ponto de batida no eixo. O deslocamento pendular era limitado por outro fio de nylon, também com 0,8 mm de diâmetro, porém com 35 cm de comprimento. Desta forma, cada impacto dava-se por meio do alongamento do fio limitador.

Esta montagem reduziu, de forma significativa, a variação dos valores de força, velocidade e aceleração no momento de cada impacto. A Figura 18 ilustra o esquema da montagem. Na Figura 18 *a*) a haste encontra-se na posição de recolhimento. Após ser solta, realizava movimento pendular até o ponto de batida na região central de cada eixo. A Figura 18 *b*) mostra a haste em contato com o ponto de batida no eixo.

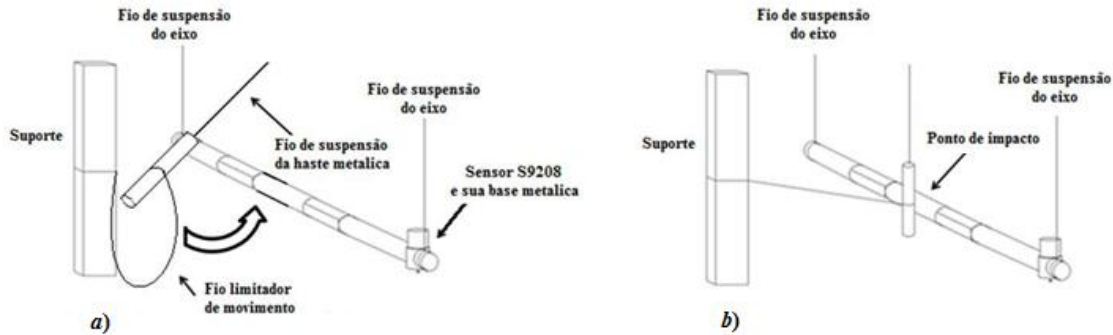


Figura 18 – Conjunto completo para análise de sinais em eixos estacionários. Em *a*) a haste encontra-se recolhida antes de seu movimento pendular. Em *b*) a haste toca o eixo no ponto de batida. Pimentel Junior, Bolsoni e Faria (2015).

b) Aquisição de Sinais

Foram realizados cinco ensaios de batidas em cada um dos eixos, totalizando trinta ensaios. Os sinais foram captados pelo sensor S9208 e registrados pelo programa Lab View, a uma taxa de aquisição de 400 kHz durante 0,4 s. A região do gráfico correspondente ao tempo de cada batida, de 0,0 s a 0,2 s, foi desconsiderada em cada análise. Nestas regiões os sinais se encontravam com elevada perturbação devido aos efeitos do instante da batida da haste contra o eixo. Desta forma, utilizou-se para análise o intervalo de tempo de 0,2 s a 0,4 s, no qual os sinais captados apresentavam-se influenciados apenas pelas suas frequências naturais. Cada ensaio produziu um total de 8×10^4 amostras. A Figura 19 apresenta, como exemplo, o intervalo considerado para análise do sinal de EA coletado durante a segunda batida realizada no Eixo 3.

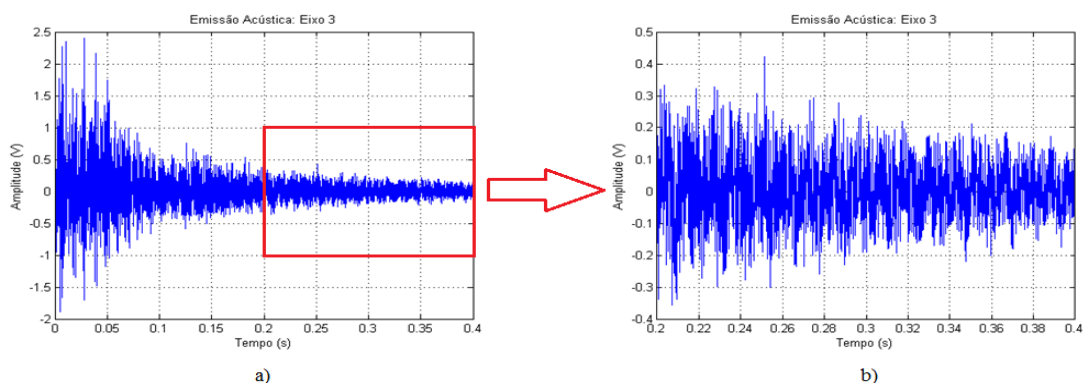


Figura 19 – Intervalo considerado para análise do sinal de EA coletado durante a segunda batida realizada no Eixo 3. Em *a*) o sinal captado e em *b*) a região considerada para análise (0,2s a 0,4s).

c) Análise de sinais

Todos os sinais foram transformados em arquivo Float 64, ordenado no formato Little-Endian, contendo o valor da amplitude e a sua localização no domínio do tempo. Utilizou-se o programa MatLab R2012a para a análise destes valores. Para cada eixo foi gerado um histograma pontual de distribuição das frequências dos valores das amplitudes dos sinais de cada um dos cinco ensaios de batidas. Em seguida estes histogramas foram sobrepostos. A Figura 20 apresenta, como exemplo, o procedimento realizado no Eixo 1.

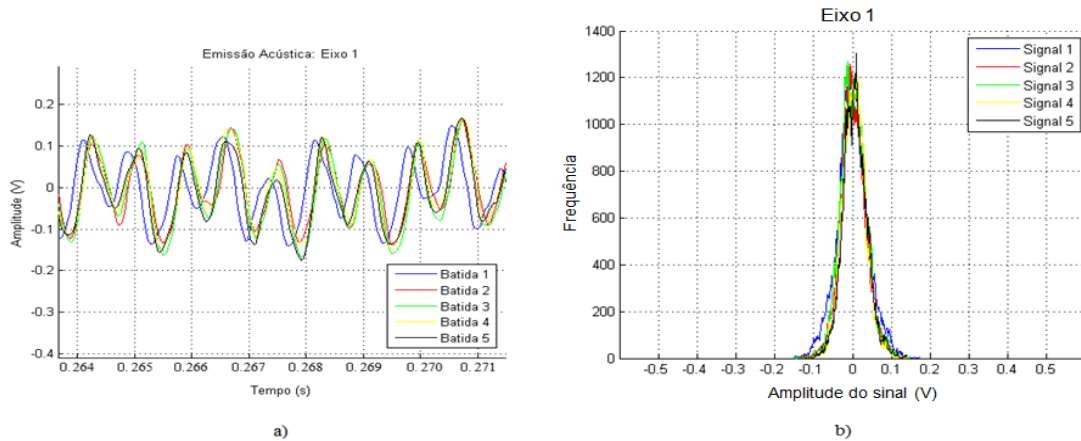


Figura 20 – Sinais de EA captados dos cinco ensaios de batidas no Eixo 1. Em *a*) sobreposição dos sinais captados dos cinco ensaios de batidas e em *b*) sobreposição dos histogramas pontuais dos valores das amplitudes dos sinais.

Calcularam-se a Média \bar{X} e o Desvio Padrão σ dos valores das amplitudes dos sinais captados para cada uma das cinco batidas, por meio das Equações 4 e 5.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad \text{Eq. 5}$$

Com base nestes valores foram calculados uma única média \bar{X}_{EIXO} e um único Desvio Padrão σ_{EIXO} para cada eixo, assim foi possível gerar as distribuições normais ideais relativas a cada eixo.

Finalmente calcularam-se a Obliquidade Estatística α_3 e a Curtose α_4 , respectivamente o terceiro e quarto momentos em torno da Média \bar{X} , relativas aos valores das amplitudes dos sinais de EA captados, por meio das Equações 6 e 7.

$$\alpha_3 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2} \right)^3} \quad \text{Eq. 6}$$

$$\alpha_4 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \right)^2} \quad \text{Eq. 7}$$

3.3.2. Eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos

A Bancada Compacta de Testes Dinâmicos utilizada neste estudo foi desenvolvida pelo Grupo de Dinâmica de Rotores (GDR), do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Minas Gerais. O aparato pode ser dividido em dois grupos, o de análise e o de acionamento.

O grupo de análise é constituído por uma base de apoio, dois suportes para mancais hidrodinâmicos, dois mancais hidrodinâmicos, quatro retentores de óleo, seis eixos rotativos, utilizados separadamente, e dois discos de carregamento. Neste grupo foi instalado o sensor de EA e extraídos os sinais de EA. O grupo de acionamento constitui-se de uma base de apoio, dois suportes para mancais de rolamentos, dois mancais de rolamentos, um eixo rotativo, uma polia acionada, uma correia micro “v”, uma polia de acionamento, um motor trifásico, um inversor de alimentação e um acoplamento flexível, o qual transmite movimento ao grupo de análise. A diferença entre os diâmetros das polias motora e movida produzia um fator de multiplicação entre as velocidades do motor elétrico e dos grupos de acionamento e análise, como mostra a Equação 4.

$$\Omega_{\text{Eixo}} = 2,725 \times \Omega_{\text{Motor}} - 0,623 \quad \text{Eq. 4}$$

Onde Ω_{Eixo} é a velocidade de rotação dos grupos de acionamento e análise e Ω_{Motor} é a velocidade de rotação do motor elétrico, segundo Machado (2004). A Figura 21 apresenta o conjunto da Bancada Compacta de Testes Dinâmicos.



Figura 21 – Bancada Compacta de Testes Dinâmicos.

a) Montagem

Conforme Sikorska e Mba (2008), a confiabilidade dos resultados de trabalhos com sinais de EA depende diretamente do tratamento de ruídos no conjunto de análise, desta forma houve a necessidade de se proceder algumas medidas de controle às interferências eletromagnéticas.

i. Aterramento da rede elétrica

Após a execução do aterramento da rede elétrica do GDR, a interferência de ruído da frequência de 60 Hz e seus harmônicos 120 Hz e 180 Hz foi extremamente reduzida no sinal captado;

ii. Aterramento do Inversor de alimentação do motor

Após a execução do aterramento da rede elétrica do GDR ainda era notada a presença de amplitudes elevadas na frequência de 10 kHz no sinal captado. Com a execução do aterramento da alimentação do Inversor de Frequências este tipo de interferência foi extremamente reduzido. Esta interferência é causada pelo chaveamento do Inversor;

iii. Aterramento dos cabos de alimentação do motor

Conforme o guia técnico do fabricante do motor, os cabos de alimentação de motores elétricos, alimentados por Inversores de Frequências, podem induzir a circulação de correntes parasitas entre partes metálicas, desta forma manteve-se uma distância entre os cabos de alimentação do motor e o cabo de transmissão de sinais do sensor ao console PXI 1042;

iv. Aterramento do console PXI 1042

Após a execução do aterramento da rede elétrica do GDR a interferência da frequência de 60 Hz e seus harmônicos foi extremamente reduzida no sinal captado. Com a criação de um ponto de aterramento para o console PXI 1042, a interferência destas frequências foi eliminada;

v. Aterramento da estrutura da bancada compacta

Com a execução do aterramento da Bancada Compacta de Testes Dinâmicos as interferências das frequências de rotação do motor elétrico no sinal captado foram bastante reduzidas. Este tipo de interferência era causado pelo campo magnético do motor elétrico;

vi. Instalação do sensor de EA

Após a execução do aterramento da estrutura da Bancada Compacta de Testes Dinâmicos as interferências das frequências de rotação do motor elétrico ainda podiam ser percebidas no sinal

captado. Com a instalação do sensor S9208 no suporte do mancal esquerdo da bancada esta interferência foi extremamente reduzida no sinal captado. Esta interferência ocorria pela proximidade entre o sensor S9208 e o campo magnético do motor elétrico;

vii. Isolamento do contato entre o sensor de EA e a estrutura metálica do suporte do mancal hidrodinâmico

Após a execução das medidas de controle v e vi ainda era possível perceber as interferências das frequências de rotação do motor elétrico no sinal captado. Com a execução do do isolamento do contato entre o sensor S9208 e o suporte do mancal hidrodinâmico, por meio da instalação de fita isolante na região do contato, este tipo de interferência foi eliminado.

O sensor S9208 foi fixado, por meio de fita adesiva, ao suporte do mancal esquerdo da Bancada Compacta de Testes Dinâmicos, desta forma foi possível comprimir a superfície do sensor contra a região isolada na superfície do suporte do mancal. Utilizou-se graxa de lubrificação como meio de transmissão entre estas superfícies. A Figura 22 apresenta o conjunto.



Figura 22 – Fixação do sensor de EA ao suporte do mancal esquerdo.

b) Aquisição de sinais

Para aquisição dos sinais utilizou-se uma frequência de amostragem de 2 MHz. Os sinais foram captados durante quatro segundos, perfazendo um total de 8×10^6 amostras, para cada valor de velocidade analisada. Dos seis eixos preparados para este estudo, apenas os Eixos 1 à 4 suportaram os ensaios. Os Eixos 5 e 6 apresentaram elevada vibração, em velocidades próximas e durante a transposição da primeira velocidade crítica do sistema, sofrendo empenamento. Isto inviabilizou as aquisições dos sinais destes dois eixos, mesmo na velocidade de 1.107 RPM.

Nenhum dos eixos apresentava carregamento externo instalado, conforme os estudos de Saavedra e Cuitiño (2002), onde os autores afirmam que para um eixo rotativo com velocidades

moderadas, abaixo da primeira velocidade crítica, considerando-se o carregamento de seu próprio peso como sendo muito maior que o efeito do desbalanceamento, haverá a abertura e o fechamento da trinca durante uma revolução.

Cada eixo foi ensaiado em quatro velocidades operacionais diferentes, sendo uma subcrítica, no valor de 1.107 RPM e três supercríticas, nos valores de 2.250 RPM, 4.377 RPM e 6.012 RPM, produzindo dezesseis ensaios. Estas velocidades foram escolhidas por não apresentarem suas frequências de rotação semelhantes a outros valores verificados nos espectros de frequências do sinal captado pelos softwares Sound and Vibration e Lab View.

A elevação de um valor de velocidade operacional para outro, entre cada ensaio, era feita manualmente, por meio do painel de controle do inversor de alimentação do motor, sem a necessidade de parada do sistema. Ao se atingir a primeira velocidade operacional de análise acionava-se, manualmente, a interface de aquisição de dados do software Lab View.

Os sinais eram captados por um período de quatro segundos. Em seguida a velocidade operacional era novamente elevada até seu próximo valor e assim sucessivamente até o término do período de aquisição daquele ensaio. O motor era desligado por meio da botoeira de seu inversor de alimentação. Aguardava-se a parada completa do sistema para troca do eixo e a montagem de um novo conjunto.

c) Análise de sinais

Os sinais captados durante cada ensaio foram convertidos em linguagem adaptada ao software MatLab R2012a. Os dados foram analisados utilizando-se a caixa de ferramentas do pacote Wavelet do mesmo software. Por meio do pacote Wavelet 1-D, cada sinal foi decomposto em níveis de análises.

A quantidade de níveis de análises é indicada por Sawicki, Sen e Litak (2009). Neste estudo, cada sinal foi decomposto em sete níveis de análises. Como forma de onda Wavelet optou-se utilizar a do tipo Daubechies, com cinco níveis de momento (Db5), no modo de “*decomposição total*”, o qual mostra cada um dos sete níveis de análises, separadamente, em um mesmo gráfico.

A Figura 23 mostra os sete níveis de decomposição dos coeficientes de Aproximação e Detalhes dos sinais analisados, bem como a faixa de frequência operacional do sensor S9208.

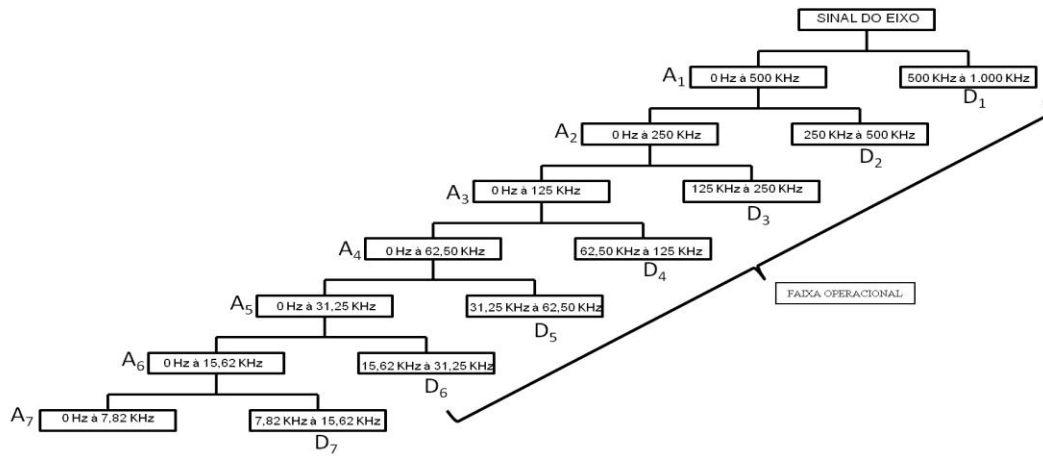


Figura 23 – Decomposição por Wavelet dos coeficientes de Aproximação e de Detalhes do sinal.

Por meio da Figura 23 é possível notar que a faixa de operação do sensor S9208, de 20 kHz à 1 MHz, está compreendida entre os níveis D₁ e D₆. Após a decomposição do sinal, o pacote Wavelet 1-D gerava, automaticamente, para cada nível de decomposição, os dados estatísticos necessários às análises. De acordo com Medeiros (2008) o Desvio Mediano Absoluto é considerado como um medidor robusto de dispersão.

Baseando-se nos trabalhos de Chacon et al. (2014), Sikorski (2012), Al-Balushi et al. (2010) este estudo analisou e comparou os valores estatísticos referentes aos níveis de análise D₁ ao D₄, os quais abrangem as frequências de 100 kHz à 1 MHz. A Figura 24 apresenta a decomposição do sinal captado a faixa de operação do sensor S9208 e a faixa de frequências analisadas.

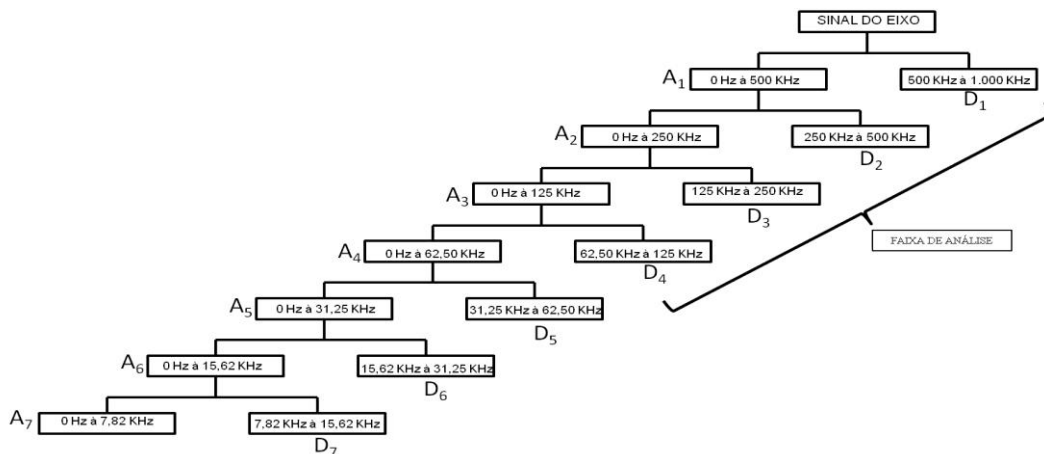


Figura 24 – Decomposição de sinais de EA, a faixa de operação do sensor e a faixa de frequências analisadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta uma visão detalhada dos resultados obtidos nas duas etapas da metodologia de análise dos sinais de EA. A primeira seção refere-se aos resultados da análise dos sinais de EA captados dos eixos estacionários e a segunda refere-se aos resultados da análise dos sinais de EA captados dos eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos.

4.1. Eixos estacionários

A Figura 25 apresenta a sobreposição dos histogramas pontuais dos valores das amplitudes dos sinais de EA captados dos cinco ensaios de batidas realizados nos Eixos 1 e 2.

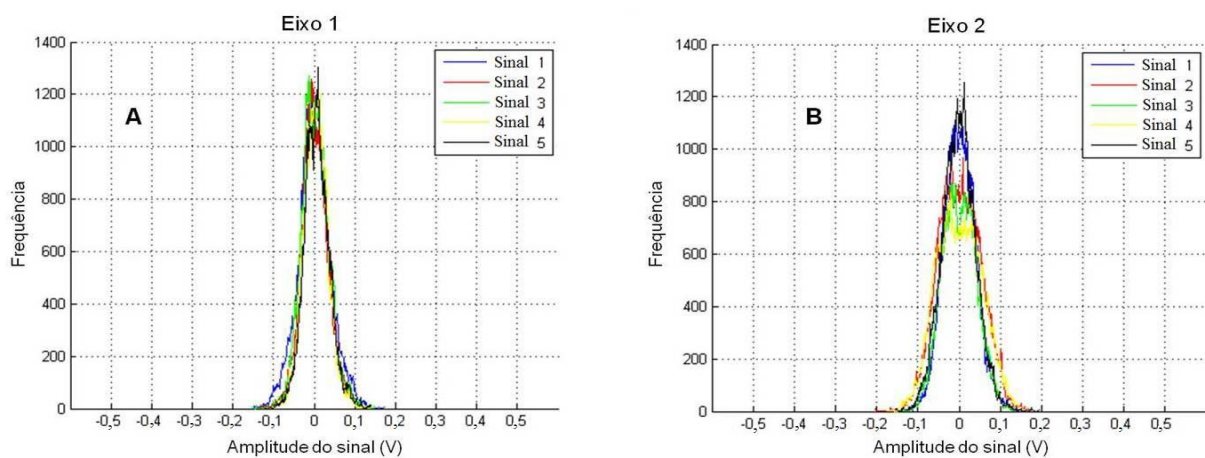


Figura 25 – Histogramas pontuais de comparação entre os sinais de EA. A) Eixo 1 e B) Eixo 2.

A Figura 26 apresenta a sobreposição dos histogramas pontuais dos valores das amplitudes dos sinais de EA captados dos cinco ensaios de batidas realizados nos Eixos 3 e 4.

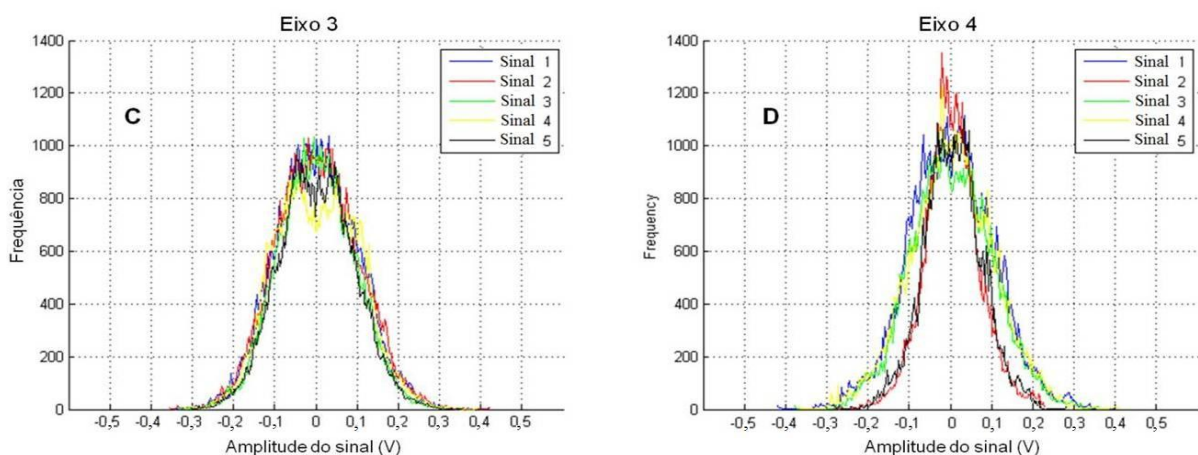


Figura 26 – Histogramas pontuais de comparação entre os sinais de EA. C) Eixo 3 e D) Eixo 4.

A Figura 27 apresenta a sobreposição dos histogramas pontuais dos valores das amplitudes dos sinais de EA captados dos cinco ensaios de batidas realizados nos Eixos 5 e 6.

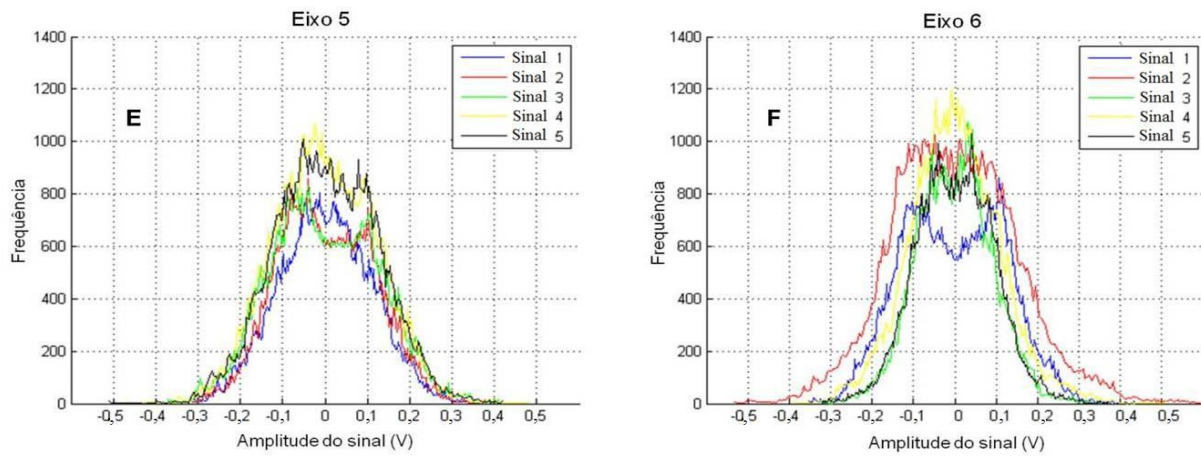


Figura 27 – Histogramas pontuais de comparação entre os sinais de EA. E) Eixo 5 e F) Eixo 6.

A Tabela 3 apresenta os valores da Média \bar{X} e do Desvio Padrão σ para cada uma das cinco batidas realizadas nos Eixos 1 à 6.

Tabela 3 – Valores da média \bar{X} e do Desvio Padrão σ para cada uma das cinco batidas em cada eixo.

EIXO 1			EIXO 2		
BATIDA	\bar{X}	σ	BATIDA	\bar{X}	σ
1ª	0,00057530	0,0404480	1ª	0,00136942	0,0385838
2ª	0,00208222	0,0333522	2ª	0,00096739	0,0513712
3ª	0,00227172	0,0339202	3ª	0,00093569	0,0412280
4ª	0,00388823	0,0305689	4ª	0,00115363	0,0536182
5ª	0,00626447	0,0317023	5ª	-0,00070095	0,0407865

EIXO 3			EIXO 4		
BATIDA	\bar{X}	σ	BATIDA	\bar{X}	σ
1ª	0,00228408	0,0978883	1ª	0,00267074	0,1038930
2ª	0,00344543	0,0999254	2ª	0,00478774	0,0679585
3ª	0,00267901	0,0916003	3ª	0,00426724	0,0990401
4ª	0,00431552	0,0997177	4ª	0,00500807	0,1028480
5ª	0,00299932	0,0904205	5ª	0,00590559	0,0717113

EIXO 5			EIXO 6		
BATIDA	\bar{X}	σ	BATIDA	\bar{X}	σ
1ª	0,00124534	0,108224	1ª	-0,00178301	0,12291
2ª	0,00204939	0,111813	2ª	-0,00118713	0,14979
3ª	-0,00055818	0,126195	3ª	0,00032036	0,09033
4ª	-0,00034044	0,121044	4ª	0,00027272	0,10900
5ª	0,00322895	0,120878	5ª	0,00045949	0,09352

A partir dos valores da Tabela 3, calcularam-se uma única média \bar{X}_{EIXO} e um único Desvio Padrão σ_{EIXO} por eixo. A Tabela 4 apresenta estes valores.

Tabela 4 – Valores da Média \bar{X}_{EIXO} e do Desvio Padrão σ_{EIXO} dos valores das cinco batidas para cada eixo.

Eixo	\bar{X}_{EIXO}	σ_{EIXO}
1	0,003626660	0,032385900
2	0,000432356	0,042992375
3	0,003069483	0,094906700
4	0,003982017	0,101927033
5	0,001094927	0,119982500
6	-0,000899138	0,127265333

Com base nos valores da Tabela 4 foi possível gerar as distribuições normais ideais relativas à cada um dos eixos. A Figura 28 mostra a comparação entre os histogramas pontuais ideais de cada eixo. Percebe-se o aumento do Desvio Padrão σ_{EIXO} à medida que a profundidade p da trinca transversal aumenta.

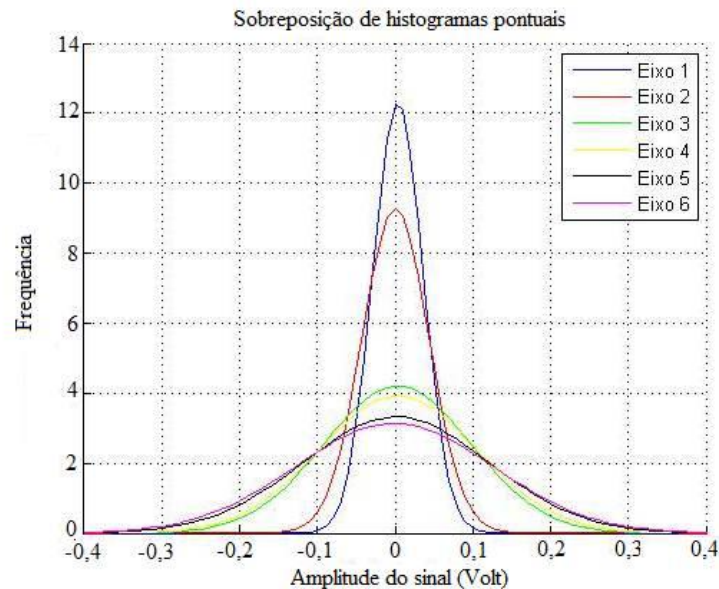


Figura 28 – Distribuição das densidades de frequências das amplitudes dos sinais de EA, para cada um dos eixos.

Ainda com base nos valores da Tabela 4 foi possível calcular os valores da Obliquidade Estatística α_3 e da Curtose α_4 para cada um dos eixos, a Tabela 5 mostra estes valores. É possível perceber a diminuição dos valores de α_3 e α_4 à medida que a profundidade p da trinca transversal aumenta.

Tabela 5 – Valores da Obliquidade Estatística e da Curtose para cada eixo.

Eixo	α_3	α_4
1	2,571204037268968	8,347917255135211
2	2,083357350231635	5,947854644597201
3	0,880486883586829	2,225201824844565
4	0,778702767243726	2,056556545486382
5	0,550249606556120	1,763562767740631
6	0,469820582097831	1,688743240241021

Os valores decrescentes de α_4 , apresentados na Tabela 5 indicam, matematicamente, a ocorrência de um achatamento dos histogramas pontuais dos valores das amplitudes do sinais de EA à medida que a profundidade p da trinca aumenta.

Ainda pela análise da Tabela 5, os valores decrescentes α_3 , embora não sejam visualmente perceptíveis na Figura 28, indicam a ocorrência de um deslocamento, da direita para a esquerda, dos histogramas pontuais dos valores das amplitudes dos sinais de EA à medida que a profundidade p da trinca aumenta.

Foi possível estimar três aproximações capazes de representar o aumento da profundidade p da trinca transversal à medida que os valores de α_4 diminuem. A Figura 29 apresenta estas aproximações.

A curva de cor preta mostra o aumento da profundidade p da trinca. A curva de cor verde mostra a aproximação Logarítmica e a curva de cor azul a aproximação Exponencial.

A curva de cor vermelha mostra a aproximação Polinomial, de terceira ordem, a qual possui boa representatividade para a relação entre a diminuição dos valores de α_4 e o aumento da profundidade p da trinca transversal.

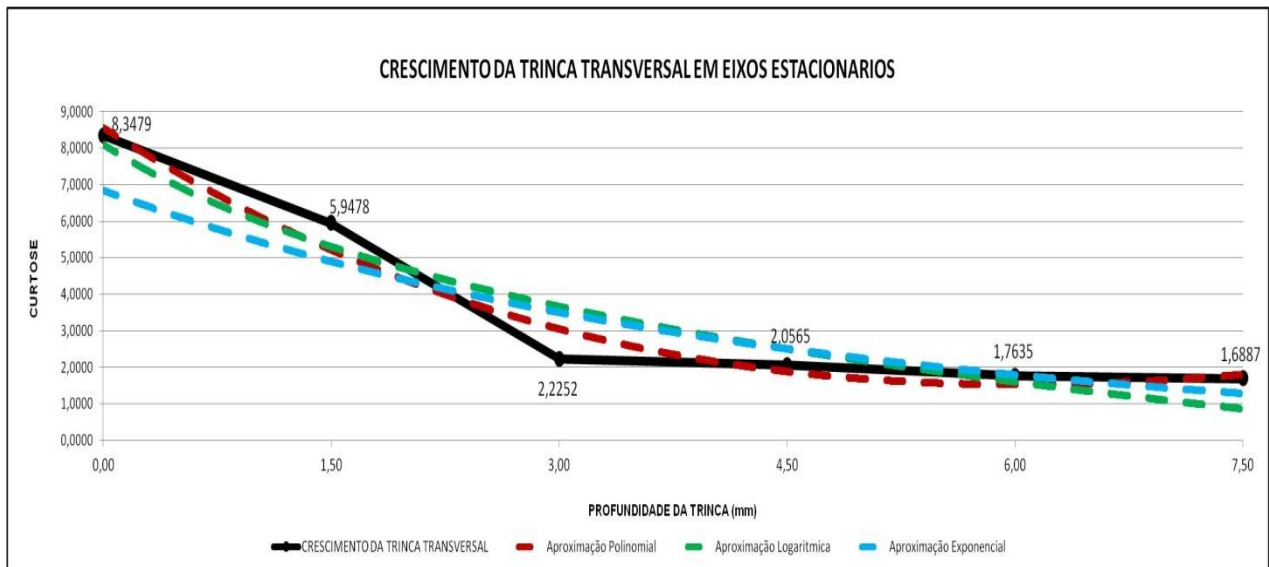


Figura 29 – Aproximações Polinomial, Logarítmica e Exponencial para a relação entre os valores de α_4 e a profundidade p de uma trinca transversal.

A Tabela 6 apresenta as três equações de aproximação para o crescimento de uma trinca transversal em eixos estacionários.

Tabela 6 – Equações de aproximação para o crescimento da trinca transversal em eixos estacionários.

Polinomial de 3ª ordem	$Y = -0,0308X^3 + 0,7764X^2 - 5,4606X + 13,275$
Logarítmica	$Y = -4,042\ln(x) + 8,1038$
Exponencial	$Y = 9,5622e^{-0,335X}$

4.2. Eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos

A Figura 30 apresenta a decomposição dos sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade operacional de 1.107 RPM.

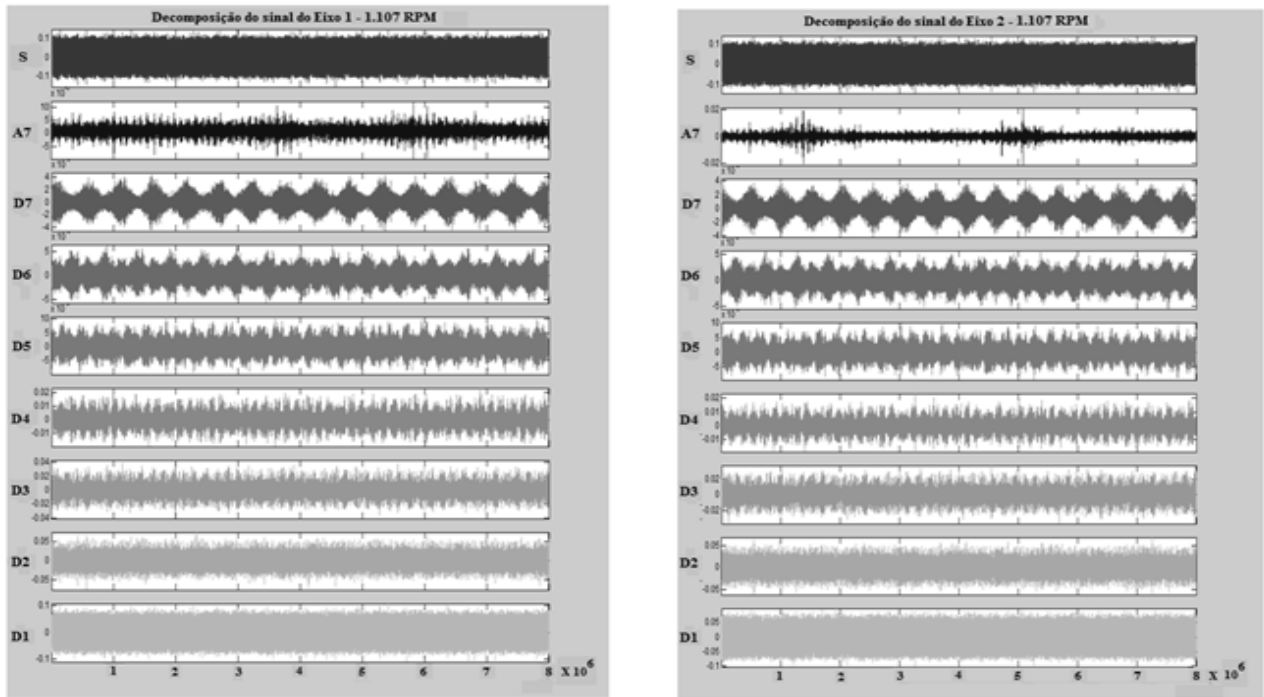


Figura 30 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade operacional de 1.107 RPM.

A Figura 31 apresenta a decomposição dos sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade operacional de 1.107 RPM.

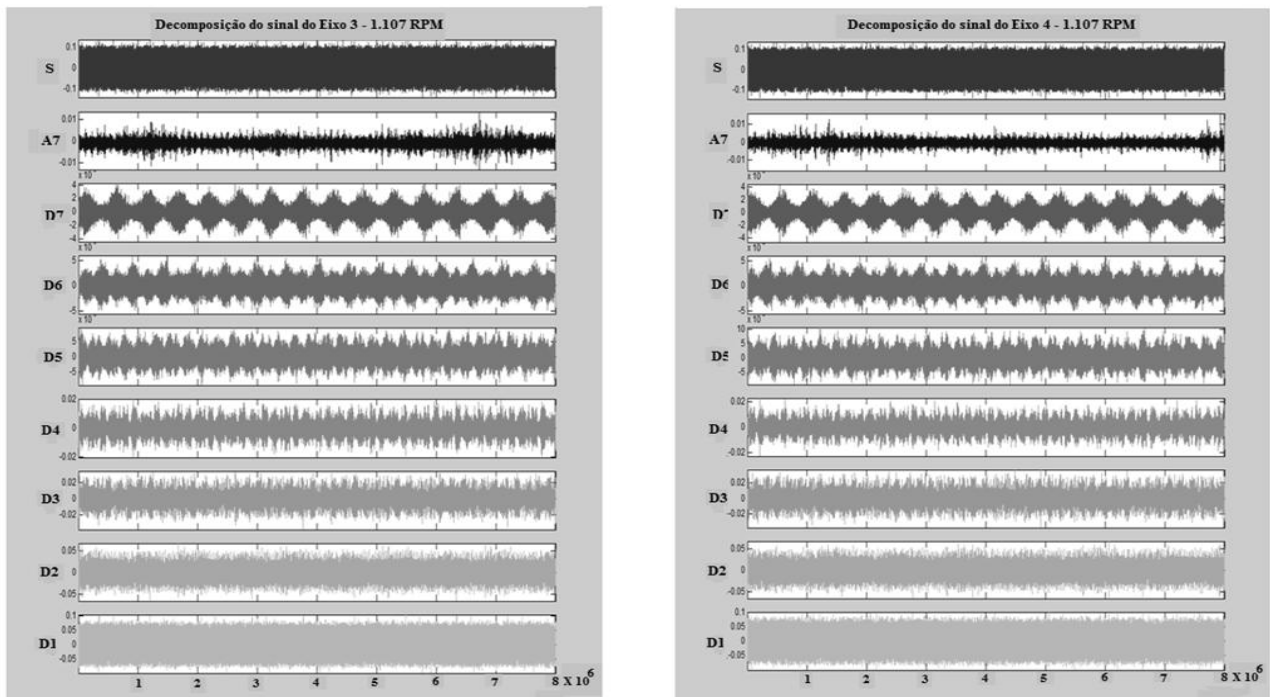


Figura 31 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade operacional de 1.107 RPM.

A Tabela 7 apresenta os valores do Desvio Mediano Absoluto, nos níveis de análise D_1 a D_4 , para os Eixos 1 a 4, extraídos do pacote Wavelet – 1D, do MatLab 2012a, na velocidade operacional de 1.107 RPM.

Tabela 7 – Valores do Desvio Mediano Absoluto dos níveis de análise D₁ ao D₄ para a velocidade operacional de 1.107 RPM.

	NIVEL	EIXO	DESV MED ABS
	1.107 RPM	D1	EIXO 1
EIXO 2			0,001123
EIXO 3			0,001123
EIXO 4			0,001123
D2		EIXO 1	0,001275
		EIXO 2	0,001271
		EIXO 3	0,001259
		EIXO 4	0,001276
D3		EIXO 1	0,001488
		EIXO 2	0,001478
		EIXO 3	0,001459
		EIXO 4	0,001474
D4		EIXO 1	0,002085
		EIXO 2	0,002018
		EIXO 3	0,002013
		EIXO 4	0,002049

Pela análise da Tabela 7 observa-se que, na velocidade operacional de 1.107 RPM, para o nível de análise D₁, os valores do Desvio Mediano Absoluto permanecem constantes, para todos os eixos, à medida que a profundidade p da trinca transversal aumenta. Este fenômeno sugere o início da atividade de Emissão Acústica, como consequência da liberação de energia devido ao “Breathing Effect”, conforme Saavedra e Cuitiño (2002) relataram em seus estudos.

A Figura 32 apresenta a decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade operacional de 2.250 RPM.

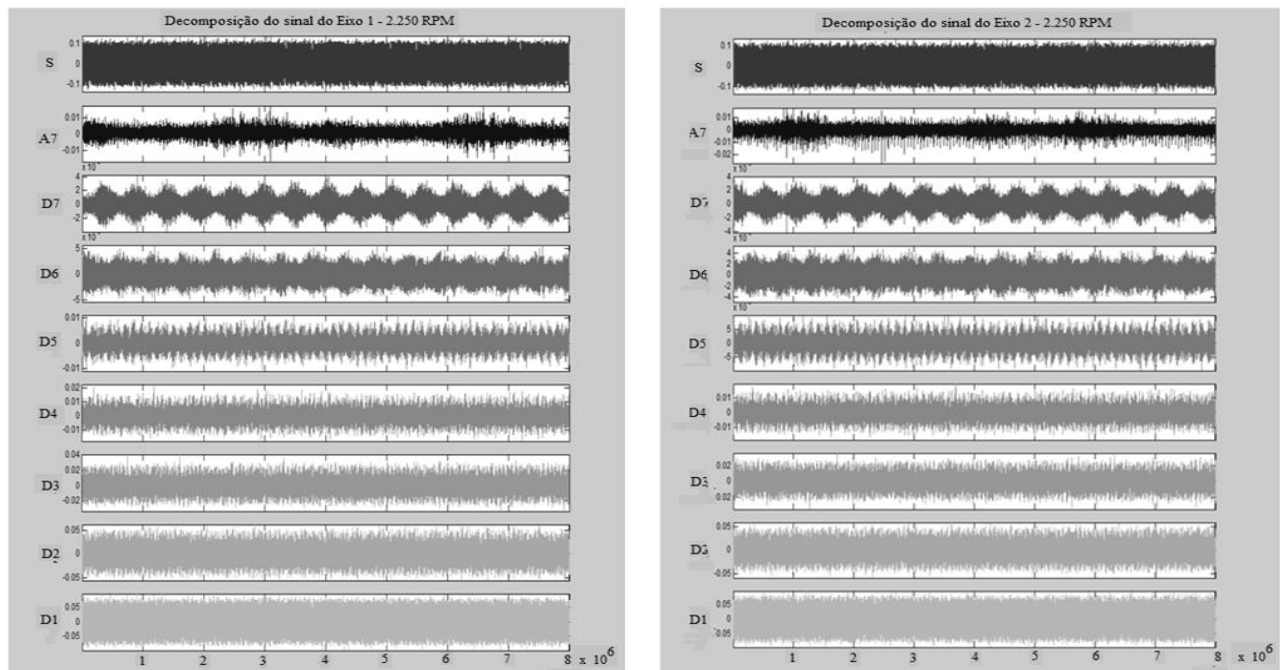


Figura 32 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade operacional de 2.250 RPM.

A Figura 33 apresenta a decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade operacional de 2.250 RPM.

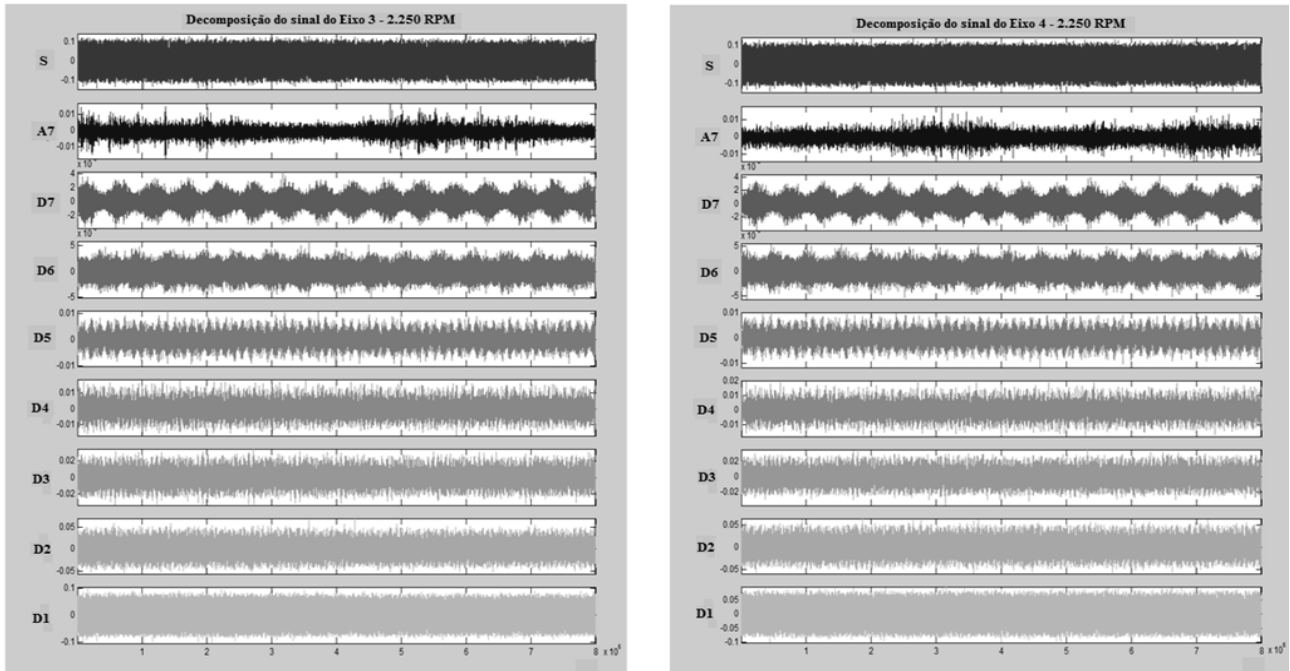


Figura 33 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade operacional de 2.250 RPM.

A Tabela 8 apresenta os valores do Desvio Mediano Absoluto nos níveis de análise D₁ ao D₄, para os Eixos 1 à 4, extraídos do pacote Wavelet – 1D, do MatLab 2012a, na velocidade operacional de 2.250 RPM.

Tabela 8 – Valores do Desvio Mediano Absoluto dos níveis de análise D₁ ao D₄ para a velocidade operacional de 2.250 RPM.

	NIVEL	EIXO	DESV MED ABS
	2.250 RPM	D1	EIXO 1
EIXO 2			0,001230
EIXO 3			0,001123
EIXO 4			0,001123
D2		EIXO 1	0,001331
		EIXO 2	0,001325
		EIXO 3	0,001326
		EIXO 4	0,001337
D3		EIXO 1	0,001625
		EIXO 2	0,001613
		EIXO 3	0,001607
		EIXO 4	0,001619
D4		EIXO 1	0,002202
		EIXO 2	0,002176
		EIXO 3	0,002171
		EIXO 4	0,002192

Pela análise da Tabela 8, para a velocidade operacional de 2.250 RPM, observa-se que o nível de análise D₁ apresenta uma elevação do valor do Desvio Mediano Absoluto para o Eixo 2. Observa-se, também, que no nível de análise D₂, a partir do Eixo 2, ocorre o aumento dos valores deste indicador à medida que a profundidade *p* da trinca transversal aumenta. Esta observação sugere um aumento na atividade de Emissão Acústica.

A Figura 34 apresenta a decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade operacional de 4.377 RPM.

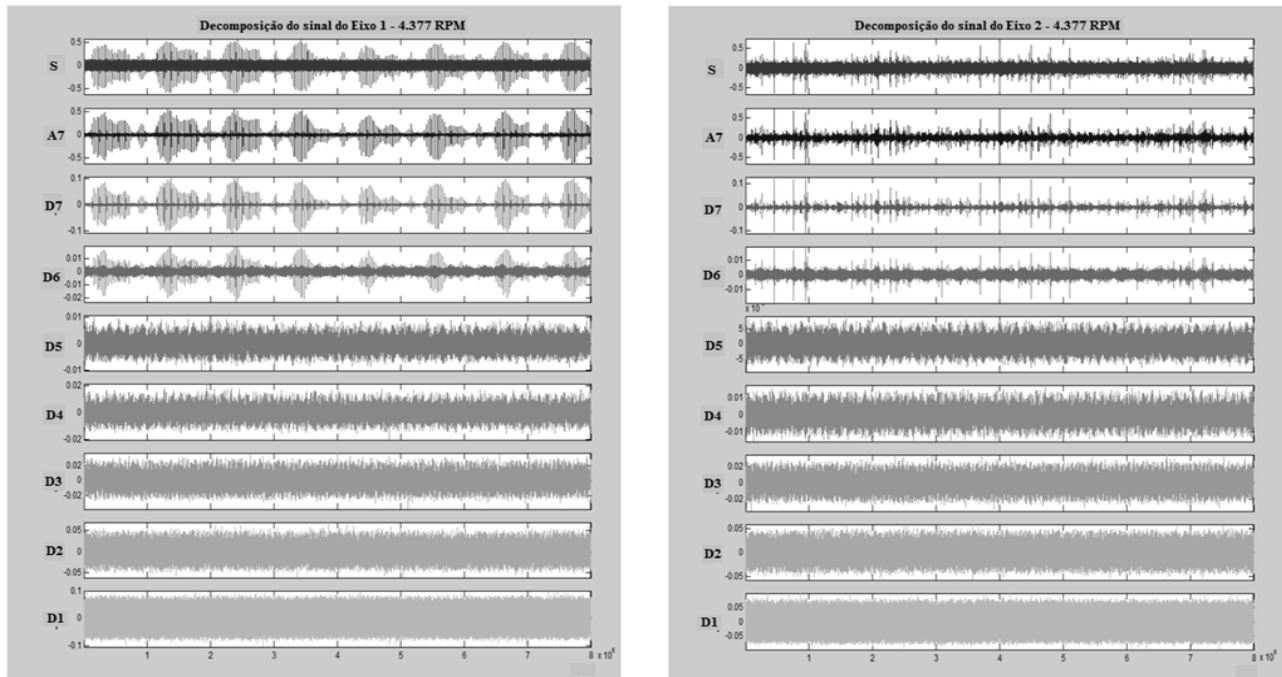


Figura 34 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade operacional de 4.377 RPM.

A Figura 35 apresenta a decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade operacional de 4.377 RPM.

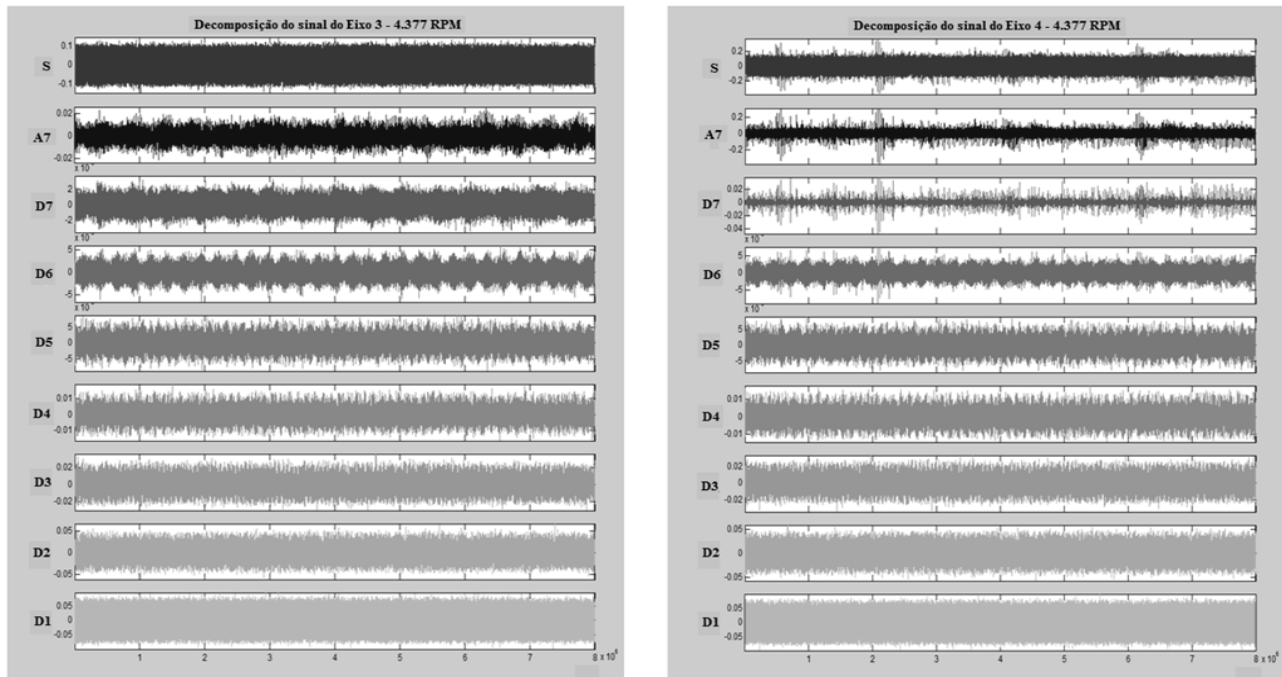


Figura 35 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade operacional de 4.377 RPM.

A Tabela 9 apresenta os valores do Desvio Mediano Absoluto nos níveis de análise D_1 ao D_4 , para os Eixos 1 ao 4, extraídos do pacote Wavelet – 1D, do MatLab 2012a, na velocidade operacional de 4.377 RPM.

Tabela 9 – Valores do Desvio Mediano Absoluto dos níveis de análise D_1 ao D_4 para a velocidade operacional de 4.377 RPM.

	NIVEL	EIXO	DESV MED ABS
4.377 RPM	D1	EIXO 1	0,001107
		EIXO 2	0,001107
		EIXO 3	0,001123
		EIXO 4	0,001123
	D2	EIXO 1	0,001348
		EIXO 2	0,001349
		EIXO 3	0,001354
		EIXO 4	0,001356
	D3	EIXO 1	0,001813
		EIXO 2	0,001799
		EIXO 3	0,001795
		EIXO 4	0,001810
	D4	EIXO 1	0,002551
		EIXO 2	0,002525
		EIXO 3	0,002516
		EIXO 4	0,002541

Pela análise da Tabela 9 observa-se que, na velocidade operacional de 4.377 RPM, para o nível de análise D_1 , os valores do Desvio Mediano Absoluto permanecem constantes, para os Eixos 1 e 2, mas com valores menores que os encontrados nas Tabelas 6 e 7, para estas mesmas condições de análise. Ainda no nível D_1 os valores deste indicador continuam constantes para os Eixos 3 e 4. Esta observação sugere uma continuidade da atividade de Emissão Acústica para o nível de análise D_1 à medida que a profundidade p da trinca transversal aumenta.

Também pela análise da Tabela 9 observa-se que no nível D_2 ocorre um aumento dos valores do Desvio Mediano Absoluto à medida que a profundidade p da trinca transversal aumenta.

Este fenômeno corrobora os estudos de Chacon et al. (2014), o qual indica que a atividade de Emissão Acústica apresenta-se, normalmente, numa faixa de frequências entre 375 kHz à 500 kHz.

O fenômeno corrobora, ainda, o estudo de Mirhadizadeh e Mba (2009), o qual afirma que a velocidade operacional do rotor tem maior influência sobre a geração de energia de EA se comparada à influência de seu carregamento.

A Figura 36 apresenta a decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade operacional de 6.012 RPM.

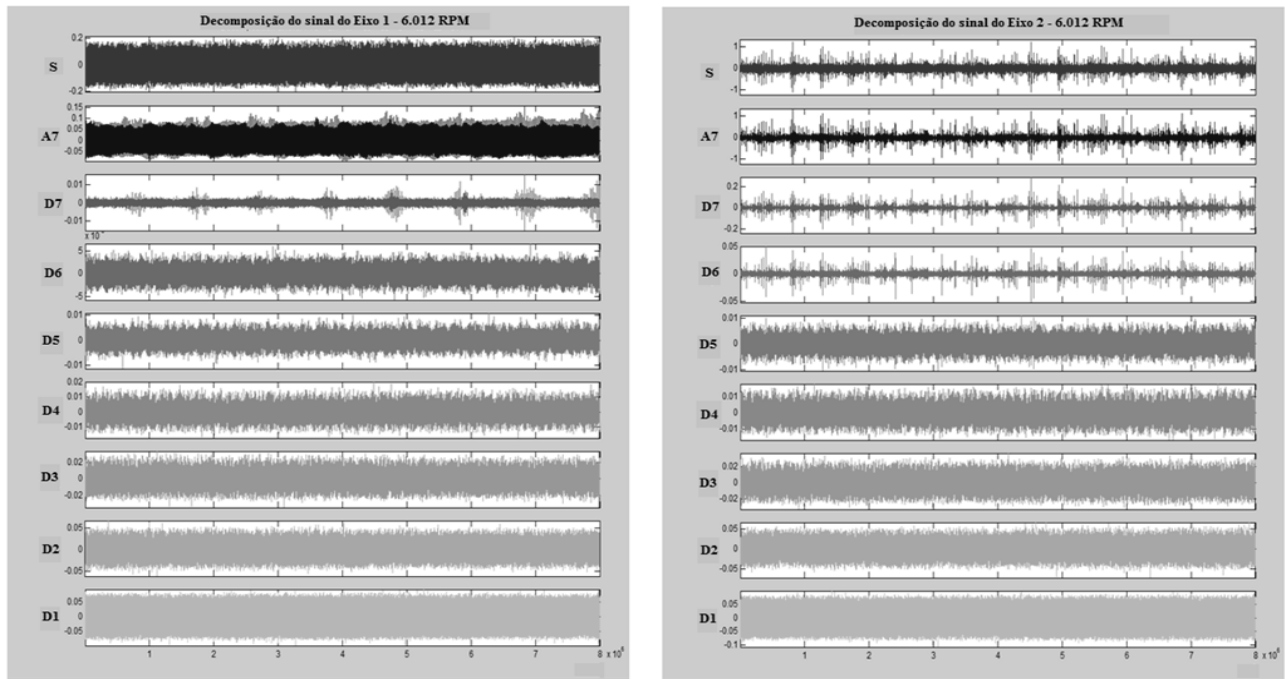


Figura 36 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 1 e 2 na velocidade operacional de 6.012 RPM.

A Figura 37 apresenta a decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4, na velocidade operacional de 6.012 RPM.

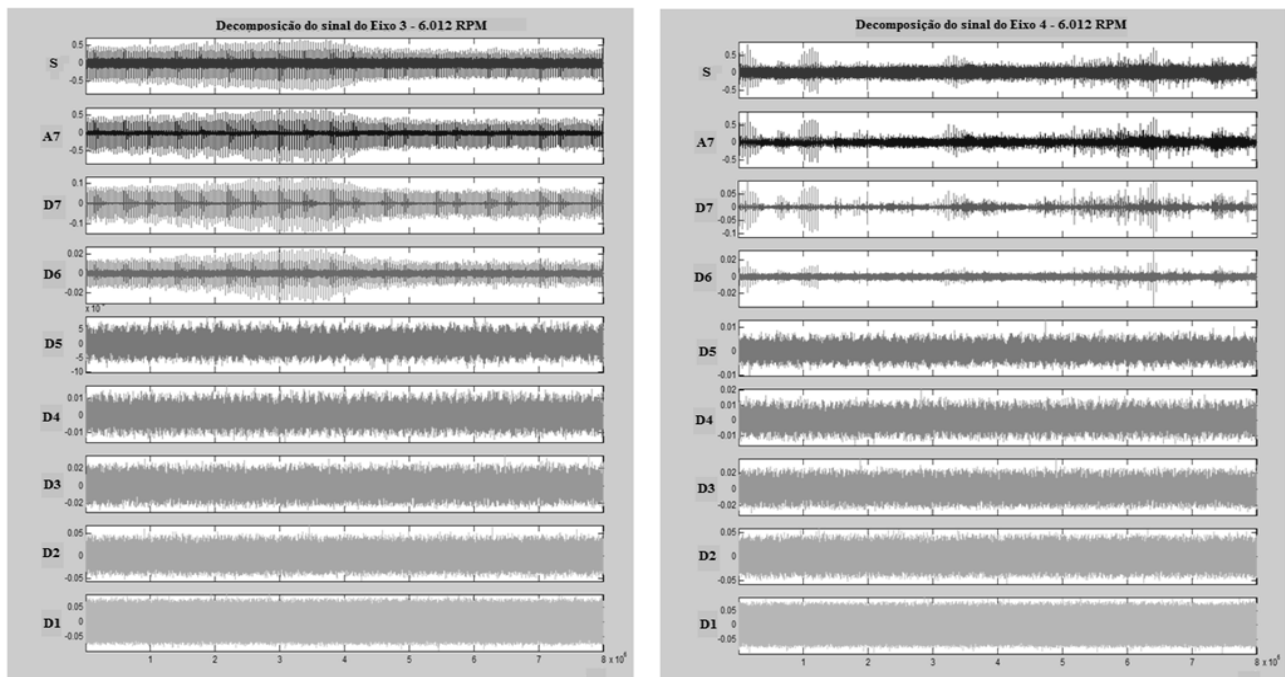


Figura 37 – Decomposição de sinais de EA dos Eixos 3 e 4 na velocidade operacional de 6.012 RPM.

A Tabela 10 apresenta os valores do Desvio Mediano Absoluto nos níveis de análise D_1 a D_4 , para os Eixos 1 a 4, extraídos do pacote Wavelet – 1D, do MatLab 2012a, na velocidade operacional de 6.012 RPM.

Tabela 10 – Valores do Desvio Mediano Absoluto dos níveis de análise D₁ ao D₄ para a velocidade operacional de 6.012 RPM.

	NIVEL	EIXO	DESV MED ABS
	6.012RPM	D1	EIXO 1
EIXO 2			0,0008247
EIXO 3			0,0011230
EIXO 4			0,0011230
D2		EIXO 1	0,0013620
		EIXO 2	0,0006516
		EIXO 3	0,0013660
		EIXO 4	0,0013670
D3		EIXO 1	0,0018210
		EIXO 2	0,0006162
		EIXO 3	0,0018210
		EIXO 4	0,0018400
D4		EIXO 1	0,0024970
		EIXO 2	0,0005877
		EIXO 3	0,0024920
		EIXO 4	0,0025180

Pela análise da Tabela 10, para a velocidade operacional de 6.012 RPM, no nível D1, observa-se que os valores do Desvio Mediano Absoluto apresentam-se constantes, para os Eixos 1, 3 e 4, mas com valores acima daqueles encontrados anteriormente, para as mesmas condições de análise.

Ainda por meio da Tabela 10, observa-se que, para o nível de análise D2, ocorre um aumento dos valores do Desvio Mediano Absoluto, para os Eixos 1, 3 e 4 à medida que a profundidade p da trinca transversal aumenta. Este fenômeno, embora apresente valores outliers para o Eixo 2, nos níveis D1 e D2, pode sugerir um aumento na atividade de Emissão Acústica para a velocidade operacional de 6.012 RPM.

Foi possível estimar três aproximações capazes de representar o aumento da profundidade p da trinca transversal à medida que aumentam os valores do Desvio Mediano Absoluto. A Figura 38 apresenta estas aproximações.

A curva de cor preta mostra o aumento da profundidade p da trinca. A curva de cor verde mostra a aproximação Logarítmica deste aumento e a curva de cor azul a aproximação Exponencial.

A curva de cor vermelha mostra a aproximação Polinomial de terceira ordem, a qual possui boa representatividade para a relação entre o aumento dos valores do Desvio Mediano Absoluto e o aumento da profundidade p de uma trinca transversal.

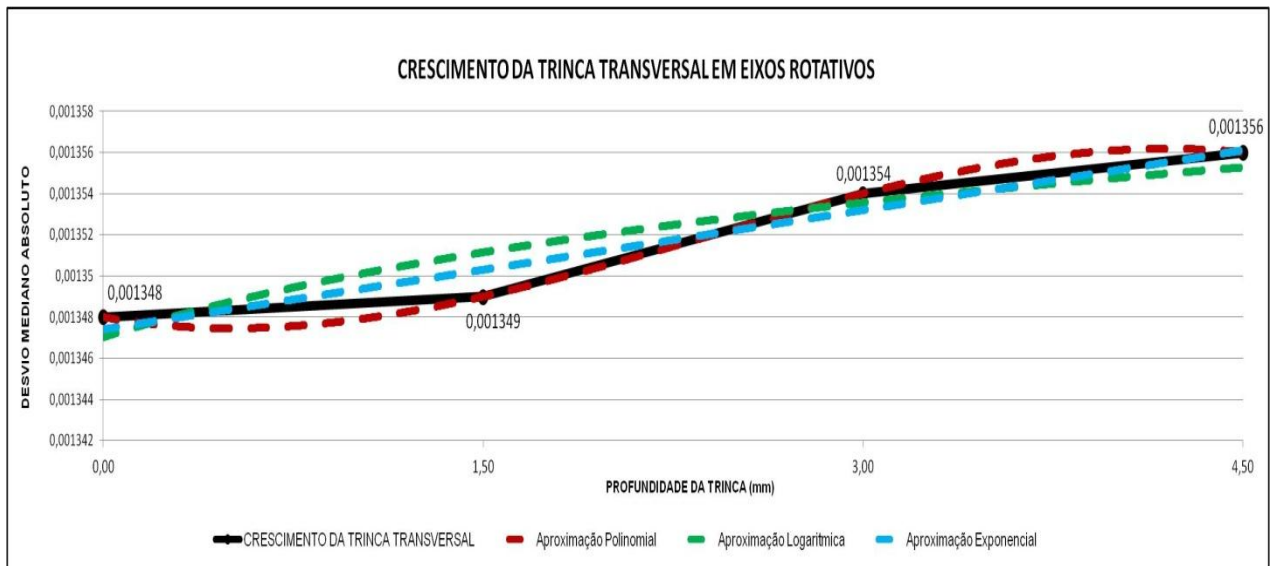


Figura 38 – Aproximações Polinomial, Exponencial e Logarítmica para a relação entre os valores do Desvio Mediano Absoluto e a profundidade p de uma trinca transversal.

A Tabela 11 apresenta as três equações de aproximação para o crescimento de uma trinca transversal em eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos.

Tabela 11 – Equações de aproximação para o crescimento da trinca transversal em eixos apoiados em mancais hidrodinâmicos

Polinomial de 3 ^a ordem	$Y = -10^{-6}X^3 + 9 \times 10^{-6}X^2 - 2 \times 10^{-5}X + 0,0014$
Logarítmica	$Y = 6 \times 10^{-6} \ln(X) + 0,0013$
Exponencial	$Y = 0,0013e^{0,0021X}$

Os resultados encontrados, nesta etapa de análise, demonstram que as ondas elásticas de EA são capazes de percorrer a seção transversal do eixo e atravessarem a camada fluido dinâmica dos mancais, continuando sua propagação através da estrutura do aparato experimental, corroborando os resultados obtidos nas pesquisas de Lu e Chu (2011) e Mba e Hall (2002).

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este estudo baseou-se nos fundamentos de Emissões Acústicas, com ênfase na análise de dados estatísticos e a aplicação transformada de Wavelet, e nos fundamentos da dinâmica de rotores, com ênfase na resposta dinâmica de seis eixos com presença de trincas transversais, as quais seguiam uma razão μ , crescente, entre os valores de suas profundidades p e o raio r da seção reta de cada eixo.

Para o caso dos eixos estacionários, as análises de Obliquidade Estatística α_3 e de Curtose α_4 dos valores das amplitudes dos sinais sugerem uma relação direta entre a diminuição dos valores destes indicadores estatísticos e o aumento da profundidade p da trinca transversal. Ainda para este caso, foram apresentadas aproximações capazes de representar a relação entre a diminuição dos valores de Curtose e o aumento da profundidade p da trinca transversal.

Para o caso dos eixos rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos, a decomposição dos sinais de EA, por meio da Transformada Discreta de Wavelet, e a análise do Desvio Mediano Absoluto dos valores das amplitudes destes sinais sugerem uma relação direta entre o aumento dos valores deste indicador estatístico e o aumento da profundidade p da trinca transversal. Ainda para este caso, foram apresentadas aproximações capazes de representar a relação entre o aumento dos valores do Desvio Mediano Absoluto e o aumento da profundidade p da trinca transversal.

Desta forma, conclui-se que este tipo de descontinuidade torna-se uma fonte de sinais de Emissões Acústicas em eixos estáticos ou rotativos. As ondas elásticas geradas por este tipo de fonte se propagam através do material, atravessando a camada hidrodinâmica do mancal, e podem ser captadas por sensores acústicos posicionados em pontos específicos do sistema.

O estudo demonstrou, ainda, algumas dificuldades enfrentadas durante a pesquisa e as medidas de controle dos efeitos indesejados das interferências eletromagnéticas sobre a Bancada Compacta de Testes Dinâmicos e os equipamentos de aquisição dos sinais de EA.

Fica evidente a necessidade de prosseguimento na análise relativa aos fenômenos de propagação de ondas de EA em máquinas rotativas. Os indicadores estatísticos de Obliquidade Estatística, Curtose e Desvio Mediano Absoluto mostraram-se efetivos na identificação da presença e da profundidade de uma trinca transversal em eixos estáticos e rotativos apoiados em mancais hidrodinâmicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Addison, P.S. -. The Illustrated Wavelet Transform Handbook (IOP Publishing Ltd, 2002, ISBN 0-7503-0692-0);

Al-Balushi K.R, Addali A., Charnley B. and Mba D. - Energy Index Technique for Detection of Acoustic Emissions Associated with Incipient Bearing Failures (Applied Acoustics 71, 2010, 812–821, 0003-682X/\$ - 2010 Published by Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.apacoust.2010.04.006);

Al-Ghamd, A.M.; Mba, D. - A Comparative Experimental Study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size (Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006) 1537–1571, doi:10.1016/j.ymsp.2004.10.013);

Baranov, V. et. al. - Acoustic Emission in Friction (B. J. Briscoe, Tribology and Interface Engineering Series 53, UK, 2007, ISBN-13: 978-0-08-045150-3, ISBN-10: 0-08-045150-0);

Cheng Li, Ning Li, Xue-Feng Chen and Zheng-Jia He - The influence of crack breathing and imbalance orientation angle on the characteristics of the critical speed of a cracked rotor (Journal of Sound and Vibration, 0022-460X/\$ - see front matter & 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.jsv.2010.11.012, 2010);

Cheng Li, Ning Li, Xue-Feng, Chen and Zheng-Jia, He - The influence of crack breathing and imbalance orientation angle on the characteristics of the critical speed of a cracked rotor (Journal of Sound and Vibration, November 2010);

Chacon J. L. F., Kappatos V., Balachandran W., and Gan Tat-Hean - A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique (Applied Acoustics 89 (2015) 88–100, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.002> ,0003-682X/ 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.);

Choudhury, A. and Tandon, N. - Application of Acoustic Emission Technique for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings (Tribology International 33, 2000, 39–45);

Egle, D. M. and Tatro, C. A. – Analysis of Acoustic Emission Strain Waves (The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 41, Number 2, 1967, 10.2 11.5 11.8 15.5);

Elforjani, M. and Mba, D. - Detecting natural crack initiation and growth in slow speed shafts with the Acoustic Emission technology (Engineering Failure Analysis 16 (2009) 2121–2129, 1350-6307/\$ - Elsevier Ltd. All rights reserved, doi:10.1016/j.engfailanal.2009.02.005);

Elforjani M. and Mba D. - Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with Acoustic Emission (Engineering Fracture Mechanics 77 (2010) 112–127, 0013-7944/\$ - Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.engfracmech.2009.09.016);

Elforjani, M. and Mba, D. - Condition Monitoring of Slow-Speed Shafts and Bearings with Acoustic Emission (Blackwell Publishing Ltd, Strain (2011), 47 Suppl. 2, 350–363 doi: 10.1111/j.1475-1305.2010.00776.x);

Ematsu, M. Y. – Análise Espectral da corrente de partida de motores de indução para a detecção de Falhas nas barras do rotor (Dissertação de Mestrado, UFSC 2008);

Gabor, D. - Theory of communication. Part 1: The analysis of information (Journal of the Institution of Electrical Engineers Part III: Radio and Communication Engineering, Volume:93, Issue: 26 Page(s): 429 – 441, DOI: 10.1049/ji-3-2.1946.0074, 1946);

Grosse, C. U. et al. – Acoustic Emission Testing (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008, Library of Congress Control Number: 2008930125, ISBN 978-3-540-69895-1, DOI 10.1007/978-3-540-69972-9);

Grossmann, A. e Morlet, J. - Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape (Society for Industrial and Applied Mathematics, 1984, Read More: <http://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/0515056>);

Haar, A. - Theorie der orthogonalen funktionen-systeme (Mathematische Annalen, 69:331–371, 1910);

Heiple, C. R. and Carpenter, S. H. - Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and Alloys - A Review: Part I. (J. Acoust. Em., 1987, Vol.6, No.2, pp. 177-204);

Kaiser, J. - Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch (Dr.-Ing. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Technischen Universität, München, 15.2.1950);

Kline, R. A., Green, R. E. and Palmer, C.H. - Acoustic Emission waveforms from cracking steel: Experiment and theory (J. Appl. Phys.52(1), January 1981, 0021-8979/81/0141-06\$01.10 © 1981 American Institute of Physics);

Kurz, J. H. - Signal Conditioning of Acoustic Emissions and Ultrasound Signals (Otto Graf-Journal Vol. 15, 2004);

Leahy, M., Mba D., Cooper P., Montgomery A., and Owen, D. - Experimental investigation into the capabilities of acoustic emission for the detection of shaft-to-seal rubbing in large power generation turbines: a case study (Engineering Tribology, 2006, JET170 # IMechE 2006 Proc. IMechE Vol. 220 Part J, DOI: 10.1243/13506501JET170);

Lifson, A. and Simmons, H.R. – Vibration Monitoring of Turbomachinery (1990);

Lima, P.C. – Wavelets: Uma introdução (Departamento de Matemática – ICEX- UFMG, 29 de julho de 2003);

Lu, Wenxiu and Ch, Fulei - Shaft crack identification based on vibration and AE signals (Shock and Vibration 18 (2011) 115–126 DOI 10.3233/SAV-2010-0580, ISSN 1070-9622/11/\$27.50 2011 – All rights reserved);

Machado, L. H. J. - Projeto e Construção de uma Bancada de Teste de Máquinas Rotativas e de Mancais (Trabalho de Graduação, UFMG, 2004);

Mathis, K. and Chmelik, F. – Exploring Plastic Deformation of Metallic Materials by the Acoustic Emission Technique (Book edited by Wojciech Sikorski, ISBN 978-953-51-0056-0, Published: March 2, 2012 under CC BY 3.0 license. © The Author(s), DOI: 10.5772/31660);

Mba D. and Hall L.D. - The transmission of acoustic emission across large-scale turbine rotors (NDT&E International 35 (2002) 529–539, 0963-8695/02/\$ - Elsevier Science Ltd. All rights reserved. PII: S0 96 3 -8 69 5 (0 2) 00 0 26 -9);

Mba, D., Cooke, A., Roby, D. and Hewitt, G. - Detection of shaft–seal rubbing in large-scale power generation turbines with acoustic emission (Proc. Instn Mech. Engrs, A01003 # IMechE 2004, Vol. 218 Part A: J. Power and Energ);

- Medeiros, R. S.* - Desvio Absoluto Mediano como Estimador Robusto no Aprimoramento de Ferramentas no Controle Estatístico da Qualidade (Dissertação de Mestrado, UFPA, 2008);
- Merry, R.J.E.* – Wavelet Theory and Applications: A literature Study (Technische Universiteit, Eindhoven, DCT 2005);
- Miller, R. K, and McIntire, P.* – Acoustic Emission Testing, Nondestructive testing handbook, Vol. 5. American Society for Nondestructive Testing, 1987, 2^o Edition, p 603;
- Mirhadizadeh S. A. and Mba D.* - Observations of acoustic emission in a hydrodynamic bearing (Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2009, doi: 10.1108/13552510910961138);
- Mirhadizadeh, S.A., Moncholi, E.P. and Mba, D.* - Influence of Operational Variables in a Hydrodynamic Bearing on the Generation of Acoustic Emission (Tribology International, 43, 2010, 1760–1767);
- Mohanty, A.R.* – Machinery Condition Monitoring: Principles and Practices (2015 by Taylor & Francis Group, LLC, Version Date: 20141104, International Standard Book Number-13: 978-1-4665-9305-3, eBook - PDF);
- Niknam, S.A., Thomas, T., Hines, J.W., and Sawhney, R.* - Analysis of Acoustic Emission Data for Bearings Subject to Unbalance (International Journal of Prognostics and Health Management, ISSN 2153-2648, 2013 015);
- Nunes, C. P.* - Estudo Experimental da Influência de Fissuras Transversais na Resposta Dinâmica de Rotores Flexíveis (Trabalho de Graduação, UFMG 2007);
- Pekeris, C.L. and Lifson, H* - Motion of the Surface of a Uniform Elastic Half-Space Produced by a Buried Pulse (The Journal of the Acoustical Society of America, volume 29, number 11 november, 1957);
- Pimentel Junior, G.L.S.; Diniz, T.L.A.; Ferreira, R.A.; Andrade, R.M. e Faria, M.T.C.* – Análise Termográfica da influência da profundidade de uma trinca em rotores suportados em mancais hidrodinâmicos (VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 10 a 15 de agosto de 2014, Uberlândia - Minas Gerais);
- Pimentel Junior, G.L.S., Oliveira, F.B. and Faria, M.T.C.* - Acoustic Emission Tests on the Analysis of Cracked Shafts of Different Crack Depths (doi:10.20906/CPS/COB-2015-1434, 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, December 6-11, 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.);
- Saavedra P. N. and Cuitiño L. A.* - Vibration Analysis of Rotor for Crack Identification (Journal of Vibration, 2002, 8: 51);
- Sawicki, J.T, Sen, A.K. and Litak, G.* - Multiresolution Wavelet Analysis of the Dynamics of a Cracked Rotor (Hindawi Publishing Corporation International Journal of Rotating Machinery volume 2009, Article ID 265198, 8pages, doi:10.1155/2009/265198);
- Sekhar, A.S.* – Detection and monitoring of crack in a coast-down rotor supported on fluidfilm bearings (Tribology International 37 (2004) 279–287, 0301-679X/\$, doi:10.1016/j.triboint.2003.10.002);

Sikorska, J.Z. and Mba, D. - Challenges and Obstacles in the Application of Acoustic Emission to Process Machinery (Process Mechanical Engineering, JPME111, IMechE, 2008, DOI: 10.1243/09544089JPME111, Proc. IMechE Vol. 222 Part E:J);

Sikorski, W. – Acoustic Emission (Copyright 2012 InTech, ISBN 978-953-51-0056-0);

Sinous J. J. and Lees A.W. - The influence of cracks in rotating shafts (Journal of Sound and Vibration, Volume 285, Issues 4-5, 2005, Pages 1015-1037);

Sinous J.J. and Lees A.W. - A non-linear study of a cracked rotor (European Journal of Mechanics A/Solids, 2006, 152–170);

Sinous J. J. - Analysis of the response of a rotor system containing a breathing crack (Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes UMR CNRS 5513, 2009, Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongues, 69134, Ecully cedex, France);

Stephens, R. W. B. and Pollock, A. A. - Waveforms and Frequency Spectra of Acoustic Emissions (Journal of Acoustic Society of America, 1971, Vol.3, No.2, pp. (904-910), 0001-4966);

Wadley, H. N. G.; Scruby, C. B. and Speake, J. H. - Acoustic emission for physical examination of metals (International Metals Reviews, 1980 N°.2);

Vance, J.M. – Rotordynamics of Thurbomachinery (1988);

Veith, R. - The Fabrication Technology of Rayleigh Wave Devices (Rayleigh-Wave Theory and Application Proceedings of an International Symposium Organized by The Rank Prize Funds at The Royal Institution, London 15-17 July, 1985, ISBN-13: 978-3-642-82623-8 e ISBN-13: 978-3-642-82621-4 DOI: 10.1007/978-3-642-82621-4);